

conaphi

ihh

orstom

senamhi



Seminario PHICAB

Editores : M.A. ROCHE

J. BOURGES

E. SALAS

C. DIAZ

ACTAS

DEL SEMINARIO SOBRE EL

PHICAB

PROGRAMA HIDROLOGICO Y
CLIMATOLOGICO DE LA CUENCA
AMAZONICA DE BOLIVIA

LA PAZ

5 y 6 de Noviembre de 1992

Organizado por:

- ORSTOM** : L'Institut Francais de Recherche Scientifique pour le
Développement en Coopération.
- SENAMHI** : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- IHH-UMSA** : Instituto de Hidráulica e Hidrología
Universidad Mayor de San Andrés.
- CONAPHI** : Comité Nacional para el Programa Hidrológico
Internacional UNESCO.

Marzo de 1993

Este seminario se realizó en adhesión a la "Semana del Agua" promovida por CONAPHI

SUMARIO

Sumario.....	1
Prefacio.....	3
Nota de los Editores.....	5
Agradecimientos.....	6

PRESENTACION DE LAS INSTITUCIONES

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) C. DIAZ E.....	9
El Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) F. CAMACHO V.....	13
El Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional (CONAPHI) E. SALAS R.....	17
L'Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération: ORSTOM M.A. ROCHE.....	21
El proyecto PHICAB : Estudio de la climatología e hidrología de Bolivia. M.A. ROCHE, C. DIAZ E., F. CAMACHO V., E. SALAS R.....	23

EL CLIMA Y EL AGUA

Estudio climatológico de la Cuenca Andina del Río Beni. J.B. CAMPOS G., J. PEÑA M.....	33
Estudio del régimen del escurrimiento superficial en la Cuenca Andina del Río Beni. L.M. CARRASCO N., J. BOURGES.....	41
Estudio sedimentológico de la Cuenca Andina del Río Beni. G. PALENQUE E., M.C. BARRAGAN G.....	51
Climatología de la Cuenca del Río Grande. C. HERBAS C.....	59
Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Itenez. (Resumen) C. CRUZ LL.....	69
Balance hídrico superficial de la Cuenca del Río Madre de Dios. N. ABASTO L.....	71

El clima de Bolivia. M. A. ROCHE.....	81
Funcionamiento de los surazos en América del Sur y efectos climáticos en Bolivia: algunos resultados. J. RONCHAIL.....	95
Balance hídrico de Bolivia. A. ALIAGA R.....	107
Red hidrométrica de Bolivia y banco de datos. J. CORTEZ M., J. MENDOZA.....	117
Los regímenes hidrológicos de la Cuenca Amazónica de Bolivia. J. BOURGES, R. HOORELBEKE, J. CORTEZ M., L.M. CARRASCO N.....	125
Distribución regional de la hidroquímica en la Cuenca Amazónica de Bolivia. J. QUINTANILLA A., J.L. GUYOT, M. CALLICONDE A.....	135
Los flujos de materias disueltas y particulares de los ríos de la Amazonía Boliviana. J.L. GUYOT, J. CORTEZ M., J. QUINTANILLA A.....	145
Hidrología de la Cuenca Amazónica Brasileira: Programa HIBAM. Primeros resultados sobre la Cuenca del Río Madera. M. MOLINIER, J.L. GUYOT, J. CALLEDE, E. DE OLIVEIRA, K. CUDO, V. GUIMARAES, M. DE AQUINO.....	155
Después del PHICAB, un nuevo Proyecto Hidrológico con ORSTOM. P. RIBSTEIN, R. HOORELBEKE, É. TIRIAU, E. SALAS R., J. CORTEZ M.....	165
La gestión de los recursos hídricos en Bolivia A. DOUROJEANI, E. SALAS R.....	175
La hidrología y los recursos hídricos de América Latina y El Caribe: El apoyo de UNESCO. C. FERNANDEZ J.....	185

A N E X O

Bibliografía completa del proyecto.....	193
---	-----

PREFACIO

El seminario sobre el programa hidrológico y climatológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia, PHICAB, se ha constituido en uno de los eventos de mayor nivel científico y de verdadera aplicación de la ciencia al desarrollo.

Se ha dicho con razón "el agua es vida" y el conocer su origen, su ubicación, sus cursos, su conservación y su influencia en el medio es ciertamente la proyección de la vida.

Cuando dicho conocimiento es sistemático, riguroso, profundo y coordinado, estamos ante la verdadera aplicación de la ciencia y la técnica, que nos permitirá utilizar tecnologías apropiadas para un manejo que signifique equilibrio ecológico, conservación de la biodiversidad y una morada más humana para los habitantes de Bolivia.

El seminario PHICAB, se refiere a la parte del territorio boliviano más extensa. En efecto, las cabeceras del Amazonas se encuentran en la altiplanicie de los departamentos de Oruro y Potosí; al extremo de que dividimos el territorio nacional en cuatro partes mediante una línea transversal y mediante una línea longitudinal, el "divortia aquarum" de las cuencas cerrada del Altiplano, del Plata y del Amazonas, se encuentra en el cuadrante Suroeste o sea el más alejado del Río Amazonas, en la altiplanicie conocida como la Pampa de Melgarejo en el departamento de Oruro.

El Gobierno del Lic. Jaime Paz Zamora ha iniciado el programa "Agua para todos" con gran respaldo internacional y nacional. Tal importantísimo programa a más del apoyo financiero y político que es definido, requiere de un puntual y adecuado conocimiento de nuestros recursos hídricos, indiscutiblemente ligados a los aspectos climatológicos y precisamente el seminario PHICAB está en el componente básico del conocimiento de nuestra realidad hídrica y climatológica para una acertada orientación del programa "Agua para todos".

Por ejemplo histórico, podemos citar el caso de Potosí y su extraordinario aporte a la Grandeza del imperio español en los siglos XVI y XVII, principalmente. Todos saben que en 1620, el censo hecho en Potosí demostró que era la segunda ciudad más poblada del inmenso imperio español. Además más poblada que París y más poblada que Londres.

Todos saben de la riqueza en plata del cerro Potosí que alimentó las arcas europeas; pero pocos saben que la explotación del cerro, la marcha de la ingenios y la dotación de agua potable, fue posible gracias a las lagunas de Kari Kari que con el genio constructor de europeos y americanos suplieron los recursos hídricos requeridos para tamaña empresa y que aún hoy siguen proveyendo agua a Potosí.

Por todo ello, el seminario PHICAB tiene importancia y transcendencia en el actual contexto y la presente publicación es un paso adelante de la más alta calidad y utilidad.

Dr. Luis OSSIO SANJINES
Vicepresidente de la República

NOTA DE LOS EDITORES

Uno de los caminos hacia el desarrollo sostenible (entiéndase aquél que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades) es sin duda la "gestión integral" de los recursos y en particular de los recursos hídricos. Requisito indispensable para ello, es el conocimiento de éstos, su distribución espacial y temporal, su cantidad y calidad.

El llegar a un conocimiento suficiente de estos aspectos, se traduce en el conocimiento pleno del funcionamiento del ciclo hidrológico. Sin embargo éste lleva consigo factores de incertidumbre, debido a que el agua se presenta en forma irregular en el tiempo y el espacio lo cual complica los procesos de gestión de los sistemas hídricos. El hecho de que la variabilidad de los procesos de precipitación y escurrimiento es muy grande hace que se requiera de estudios profundos y sistemáticos, que hasta hace unos años estuvieron muy lejos del alcance de las posibilidades técnicas del país.

En este contexto, el proyecto PHICAB, ha tratado de contribuir al conocimiento de los aspectos citados a nivel de todo el país, y en modo particular sobre la Cuenca Amazónica. Este programa es pues, un proyecto científico, esencialmente orientado hacia la investigación aplicada al desarrollo.

Más allá de los resultados técnicos brindados en los diferentes artículos condensados en esta publicación, el proyecto PHICAB dió la oportunidad de efectivizar un fructífero trabajo conjunto entre tres instituciones bolivianas (SENAMHI, IHH, CONAPHI) y la cooperación francesa (ORSTOM), el que se prolongó por más de diez años.

Los estudios llevados a cabo al interior del PHICAB, con una real colaboración, han permitido intercambiar conocimientos, métodos y también crear lazos de amistad, entre las personas que participaron de él y que -estamos seguros- seguirán más allá del proyecto, buscando el desarrollo de las ciencias hídricas.

Cabe resaltar que aunque todos los trabajos presentados durante el Seminario del 5 y 6 de Noviembre de 1992, han sido efectuados en el marco del proyecto PHICAB, podrían aparecer algunas discrepancias, principalmente a nivel de las características físicas de las cuencas vertientes (superficie, pendiente, longitud de los ríos, etc). Estas no son debidas a interpretaciones diferentes de la realidad física sino a resultados obtenidos a partir de documentos cartográficos semejantes aunque no idénticos, en modo particular, de los mapas topográficos e hidrográficos.

La redacción de cada comunicación ha sido efectuada bajo la entera responsabilidad científica de su(s) autor(es). Los editores sólo han tenido cuidado de los aspectos de forma a fin de que la presentación sea homogénea, pero respetando las cuestiones de fondo en cada uno de los trabajos.

La Paz, Marzo de 1993.

M.A. ROCHE

J. BOURGES

E. SALAS R.

C. DIAZ E.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a, todos quienes han trabajado en el marco de los proyectos del PHICAB, investigadores, ingenieros, estudiantes (tesistas) y todo el personal de apoyo en las cuatro instituciones integrantes del programa.

Hacemos extensivo nuestro agradecimiento a:

- La Embajada de la República de Francia,
- La Subsecretaría de Aeronáutica del Ministerio de Transportes y Comunicaciones,
- La Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO,
- La Universidad Mayor de San Andrés,
- L'Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération : ORSTOM,
- El Instituto de Hidráulica e Hidrología,
- El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología,
- El comité organizador compuesto por: A. Aliaga, F. Camacho, J. Cortez, C. Díaz, P. Ribstein, E. Salas y, en forma particular, a su coordinador J. Bourges, sin cuyo concurso no habría podido ser posible éste seminario,

y muy especialmente al excelentísimo Señor Vicepresidente Constitucional de la República, Dr. Luis Ossio Sanjinés y al Señor Ministro Secretario Nacional del Medio Ambiente, Ing. Gerardo Aguirre Ulloa.

Presentación

de las Instituciones

EL SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA (SENAMHI)

Carlos DIAZ E.

Director del SENAMHI, C.P. 10993, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

Para una mejor comprensión de lo que es el SENAMHI, es conveniente indicar, en primera instancia, que la ciencia Meteorológica está destinada al estudio del comportamiento de la atmósfera. Por otra parte, la hidrología es la ciencia que estudia el agua y sus variaciones estacionales en la superficie de la tierra y debajo de ella.

Ambas ciencias son herramientas destinadas a comprender el conocimiento básico del ciclo hidrológico, que por ser fuente de vida, hoy más que nunca se ha convertido en el centro del desarrollo sostenible.

EL SENAMHI

Consciente de esta realidad, el Supremo Gobierno, mediante norma legal dictada en 1968 creó el SENAMHI, como Institución pública descentralizada del Ministerio de Transportes, Comunicaciones y Aeronáutica Civil, otorgándole las siguientes principales atribuciones:

- Recolectar y centralizar datos de carácter meteorológico e hidrológico con Autoridad Nacional.
- Mantener, operar e incrementar la red nacional de estaciones hidrometeorológicas.
- Estudiar el clima, el tiempo y los regímenes hídricos del país.
- Efectuar estudios de carácter hidrometeorológico, publicarlos y difundirlos en los ambientes nacionales e internacionales.
- Asumir la representación oficial de Bolivia en reuniones y asuntos relativos a las ciencias meteorológicas e hidrológicas, etc., etc.

Para hacer frente a esta serie de obligaciones, el SENAMHI, ha estado conformado por dos departamentos, uno de meteorología y otro de hidrología con sus diferentes dependencias, al presente la Institución ha evolucionado y se ha acomodado a las exigencias actuales quedando conformado por un departamento de meteorología, hidrología, agrometeorología y, en fase de formación, el de sinóptica y, desde luego, cuenta también con un Departamento administrativo. Por otra parte, el SENAMHI cuenta con oficinas distritales en todas las capitales del país.

Ahora bien, en estricto cumplimiento de sus atribuciones, el SENAMHI ha instalado y mantiene una red de 600 estaciones hidrometeorológicas de distinto orden y en todo el país.

Ha procesado y almacenado la información recibida en estas estaciones, comprenderán ustedes, que esta labor es ardua, compleja y costosa, todo ello con costo de financiamiento del Tesoro General de la Nación.

EL SENAMHI EN EL PHICAB

El antecedente señalado ha impulsado a la Institución a buscar apoyo de Instituciones Internacionales que le permitan desarrollar de mejor manera sus actividades y cumplir adecuadamente sus objetivos. Por ello, en 1982 se buscó contacto con ORSTOM y se llegó a un feliz acuerdo para planificar los primeros pasos del PHICAB.

Este programa fue establecido dentro de un acuerdo firmado entre la República de Bolivia y Francia el año 1982. Este programa se ha realizado en forma conjunta por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. Posteriormente se integraron el IHH y el CONAPHI.

El programa ha contemplado dos disciplinas, la Hidrología y la Climatología. La primera concentró sus investigaciones en toda el área de las cuencas de los ríos Madre de Dios, Beni, Mamoré e Itenez y sus tributarios más importantes.

La climatología realizó los estudios en todo el territorio nacional, en general, el estudio de la hidrometeorología de la Amazonia en el país, tiene una honda y sentida tradición, pues han sido muchas las instituciones que con fines específicos han trabajado durante largos años, produciendo aunque en forma aislada una importante cantidad de información básica.

El trabajo realizado por el PHICAB ha comprendido por una parte trabajo operacionales en el campo y por otra parte, el estudio del conjunto de los resultados obtenidos hace años en el país, a los cuales se han integrado los datos que se han obtenido en el marco del programa.

OBJETIVOS DEL PROGRAMA

A la culminación de los trabajos realizados por el PHICAB, se ha cumplido con los objetivos propuestos al inicio del programa y que en resumen ha significado:

EN CLIMATOLOGIA

- Se ha controlado y mejorado las estaciones meteorológicas que interesaban al Programa, con la dotación de eventuales aparatos meteorológicos.
- Se han realizado estudios de las distribuciones especiales de los principales parámetros climatológicos, lluvia, temperatura, presión, viento, humedad insolación, evaporación y sus variaciones temporales a escala diaria, mensual y anual.
- Se han realizado estudios del balance hídrico adoptando las normas establecidas por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO. Estos estudios se han realizado por egresados de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSA, en coordinación con el SENAMHI y el asesoramiento técnico del PHICAB.
- Se han realizado estudios isotópicos de las precipitaciones en función de la altura.

Los resultados obtenidos por los estudios climatológicos están contenidos en informes específicos, mapas y gráficos.

A objeto de establecer relaciones de distribución y variaciones de las características climatológicas ligadas a la influencia del clima con los países vecinos, se han coordinado trabajos con los Servicios Meteorológicos de estos países a través del SENAMHI.

EN HIDROLOGIA

- Se ha efectuado el control y el mejoramiento de algunas estaciones hidrométricas existentes y se han instalado nuevas estaciones de base particularmente sobre los ejes de los ríos de las tres cuencas mayores del Río Madera.

- Se han realizado síntesis hidrológicas sobre los regímenes de la Cuenca Amazónica, con caracterización y evaluación de las variaciones espaciales y temporales de los principales parámetros hidrológicos: alturas de agua, caudales diarios, mensuales, anuales.

Este estudio está contribuyendo al conocimiento del dramático problema de las inundaciones que ocurren cada año en el oriente del país.

Los resultados obtenidos en el estudio hidrológico de la Cuenca Amazónica Boliviana, están traducidos en publicaciones específicas.

EN FISICO-QUIMICA Y TRANSPORTE SOLIDO

- Se determinaron las variaciones de las principales características químicas de los isótopos del medio y de las suspensiones de las aguas en épocas remarcables, con la realización de muestreos periódicos en las principales estaciones hidrométricas. Se estudió la conductividad, pH, temperatura, iones, sílice, isótopos y cargas en suspensión.

- Se estudió la calidad de las aguas para usos múltiples.

- Se realizaron estudios de los regímenes hidroquímicos.

- Se efectuaron evaluaciones de los balances de materiales y riesgos de colmatación de presas.

El estudio físico-químico de las aguas ha sido presentado en mapas de distribución y gráficos, resultando ser el primer trabajo de esta naturaleza en Bolivia.

COORDINACION INSTITUCIONAL

El SENAMHI, consciente de que los resultados que se obtendrían de la ejecución del Programa, desde el inicio de los estudios, hizo todos los esfuerzos dentro de sus posibilidades, para coadyuvar a los trabajos que se han realizado, dotando al programa algún equipo personal, destinando parte de sus limitados recursos económicos al éxito del Programa.

Asimismo, puso a disposición del Programa toda la información básica que requerían los estudios, lo que llegó a formar un banco de información hidrometeorológica del Programa. Este banco de información básica ha servido también para la elaboración de estudios de Tesis, que sobre balance hídrico han realizado egresados de la UMSA, para optar la licenciatura en Ingeniería Civil.

El SENAMHI, durante la ejecución del Programa, tuvo la oportunidad de capacitar a su personal técnico que colabora con el PHICAB a través de becas, para estudios en la República de Francia. Estas becas han sido dirigidas a la disciplina de hidrología, particularmente en el campo del procesamiento de información básica.

En las labores de campo que ha realizado el personal técnico de PHICAB y el SENAMHI, nuestra Institución se ha beneficiado con el entrenamiento del personal boliviano en labores de hidrometría de grandes ríos.

BENEFICIOS DEL PROGRAMA

Conscientes de que el conocimiento de los regímenes climatológicos e hidrológicos de la Cuenca Amazónica Boliviana es imprescindible para la planificación del desarrollo del país, el PHICAB ha contribuido a la obtención de los mismos, hechos que en el futuro nos permitan utilizar racionalmente los recursos hídricos de acuerdo a las peculiaridades propias de la región.

Los resultados que se han obtenido podrían ser aplicados directamente para establecer estrategias de lucha contra inundaciones y sequías. Servirán para planificar la infraestructura vial de la región, de los transportes fluviales, así como del desarrollo urbano e industrial. Asimismo, se utilizarán para evaluar el potencial hidroeléctrico y contribuir a la planificación de los recursos, como la ganadería y la agricultura, altamente sensibles a las inundaciones.

Finalmente, con seguridad se puede indicar que el SENAMHI resulta ser el organismo directamente beneficiado con el programa, de ahí que ahora estamos en condiciones de asumir mayores responsabilidades en el campo de la hidrometeorología, pues contamos con información confiable, personal capacitado, y -lo que es más- tenemos una férrea voluntad de servicio en beneficio del país.

EL INSTITUTO DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA

Freddy CAMACHO V.

*Director del Instituto de Hidráulica e Hidrología
IHH-UMSA, CP 699, La Paz, Bolivia*

INTRODUCCION

El Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés, es un centro de investigación científica sin fines de lucro que desarrolla la ciencia y la técnica en el área de los recursos hídricos en concordancia con las necesidades nacionales de desarrollo técnico y social. Fue creado el 20 de marzo de 1972 en base a un Convenio entre la Universidad Técnica de Berlín (TU-Berlín) y nuestra Universidad (UMSA).

Los objetivos generales del IHH son:

- Realizar proyectos de investigación científica en el campo de los Recursos Hídricos cumpliendo planes y programas previamente aprobados.
- Desarrollar labor docente para la formación de recursos humanos especializados en Hidráulica e Hidrología vinculando esta labor con la investigación y la interacción social.
- Ejecutar proyectos de interacción social que permitan la implementación de tecnología desarrollada o adecuada en el Instituto.
- Apoyar proyectos de interés nacional realizando acciones concretas previamente planificadas y cumpliendo con los tiempos de ejecución.

Hoy día el Instituto de Hidráulica e Hidrología cuenta con equipos humanos calificados y suficiente instrumental de medición moderno, capaces de abordar con técnicas avanzadas los problemas que plantean los modelos físicos reducidos de los fenómenos hidráulicos y además la explotación y buen uso de los recursos hídricos del país.

ESTRUCTURA Y UBICACION

El Instituto de Hidráulica e Hidrología está ubicado en los predios de la UMSA en Cota Cota, utiliza una superficie de 3000 m² repartidos de la siguiente manera: 220 m² de oficinas, 2000 m² de laboratorios, 336 m² de talleres, 23 m² biblioteca y 420 m² de áreas de servicio.

RECURSOS HUMANOS

El IHH cuenta en la actualidad con 14 investigadores-docentes con las siguientes especialidades 7 hidráulicos, 5 hidrólogos, 1 electrónico y un agrónomo.

Con relación a la formación académica el 90 % ha realizado cursos de post-grado principalmente en Alemania, Inglaterra, Canadá, Colombia.

Las especialidades que abarcan los investigadores pueden resumirse de la siguiente manera:

- Transporte de sedimentos
- Regulación de ríos
- Hidrología de llanuras
- Planificación de Recursos Hídricos
- Hidrología de deshielos
- Climatología
- Agronomía Andina
- Modelos Hidráulicos reducidos
- Tecnología Apropiada
- Manejo de Cuencas
- Técnicas de Laboratorio Hidráulico
- Edafología
- Simulación matemática - Programación computacional
- Asesoramiento técnico a zonas rurales Energías(eólicas, hidráulicas, solares)
- Microcentrales hidroeléctricas.

ACTIVIDADES

Docencia

Una de las tareas importantes del IHH es la docencia universitaria, siendo responsable principalmente de las asignaturas de la mención de Hidráulica e Hidrología en la Carrera de Ingeniería Civil.

Ofrece también este servicio a la Facultad de Geología, a la Facultad de Agronomía y a la Carrera de Ingeniería Mecánica, de igual manera realiza Cursos Compactos para las Universidades del Interior sobre Prácticas de Laboratorio de Hidráulica.

Investigación e Interacción Social

Con relación a los proyectos podemos mencionar las siguientes actividades:

- Investigación :
 - Investigación aplicada
 - Investigación básica
- Proyecto de interacción social : Proyectos dirigidos principalmente al desarrollo rural campesino.
- Proyectos de generación de tecnología, adecuación de tecnología - apropiación.
- Proyectos de inventariación y cuantificación de recursos naturales como los balances hídricos, inventario nivológico, evaluación de recursos hídricos, etc.

EL IHH Y EL PHICAB

El hombre, principal factor de transformación, ha venido estableciendo en forma sistemática una imperiosa necesidad de administrar en forma planificada sus recursos hídricos, ha comprendido que la determinación del balance hídrico regional constituye la base para la ejecución de proyectos hidráulicos tendientes a la utilización racional, control y utilización del recurso agua en el tiempo y en el espacio.

Los organismos internacionales como UNESCO, recogiendo la preocupación general, a

través de un grupo de trabajo, elaboró una Guía Metodológica para la determinación del Balance Hídrico de América del Sur (1982).

La Universidad Mayor de San Andrés, mediante el Instituto de Hidráulica e Hidrología como centro de investigación científica en temas relacionados con los recursos hídricos, integra el Programa PHICAB conjuntamente con L'Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Developpement en Cooperation (ORSTOM) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para realizar estudios de la climatología e hidrología de Bolivia siendo una de sus principales tareas la de realizar el Balance Hídrico del país.

La actividad investigativa que, a través de sus docentes y estudiantes sobre recursos hídricos, realiza el Instituto de Hidráulica e Hidrología, ha encontrado en la estructura PHICAB el apoyo necesario para plasmar en realidad estudios importantes para el país; esta coordinación interinstitucional ha permitido que, del trabajo científico con el apoyo técnico financiero extranjero, y contando con los datos necesarios, se puedan desarrollar proyectos sobre la hidrología aplicada al Desarrollo.

EL COMITE NACIONAL PARA EL PROGRAMA HIDROLOGICO INTERNACIONAL DE BOLIVIA

Edgar SALAS R.

CONAPHI, CP 699, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

El Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional (CONAPHI) es una organización de coordinación técnico - científica, dedicada a la promoción de las ciencias de la hidrología y los recursos hídricos en todas sus fases y modalidades.

El CONAPHI boliviano es parte del PHI, organizado a nivel mundial bajo la tutela de UNESCO, y está compuesta por representaciones de todas las instituciones nacionales que en su actividad involucran el tema de aguas. Asimismo, pertenecen al CONAPHI - Bolivia, profesionales, libres, con formación en hidrología, recursos hídricos o ramas afines.

Este comité dió inicio a sus actividades en 1981, al influjo del entonces Experto en Aguas y Medio Ambiente de la Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de Unesco, Dr. Christiaan Gischler y de jóvenes profesionales del Instituto de Hidráulica e Hidrología de La Paz. Hoy se encuentra avocado a la conformación de subcomités regionales (en las capitales de departameto), que permitan un trabajo más fluído y efectivo.

En los últimos dos años, el CONAPHI ha puesto especial énfasis en los estudios orientados hacia un desarrollo sostenible del sector, involucrando en ellos la dimensión medioambiental. En este contexto se ha establecido una relación estrecha con organizaciones como la Secretaría Nacional del Medio Ambiente (SENMA), la Liga de Defensa del Medio Ambiente (LIDEMA). Esperamos que la cooperación con estas instituciones sea cada vez mayor ya que, como bien es conocido, el sector aguas es uno de los más importantes en el contexto de la gestión ambiental. En el rubro de hidrología, uno de los programas más importantes en los que ha participado ha sido PHICAB.

El CONAPHI de Bolivia, a través de un trabajo tesonero, ha logrado obtener un sitio de relevancia en el cotexto latinoamericano, razón por la cual hoy es depositario de tareas no solo a nivel nacional, sino también a nivel regional (p.e. a través de programas con la Universidad Andina Simón Bolívar) y continental (a través de nuestra relación con centros de formación e investigación en toda América).

LOS ORIGENES DEL PROGRAMA HIDROLOGICO INTERNACIONAL

- En 1965 la comunidad científica internacional y los gobiernos crean un programa internacional en UNESCO relativo a ciencias del agua.
- Decenio Hidrológico Internacional (DHI) 1965-1974.
Su objetivo: Mejoramiento de la base científica y tecnológica necesaria para la elaboración de metodologías y formación de recursos humanos para el desarrollo y la gestión racionales de los recursos hídricos, incluyendo la protección del medio ambiente.
- Programa Hidrológico Internacional (PHI), de 1975 en adelante
Sus objetivos generales:

- + la investigación hidrológica en un medio ambiente en evolución
- + administración de los recursos hídricos para el desarrollo sostenido.
- + enseñanza, formación, transferencia de conocimientos e información pública.

OBJETIVOS

- Asistir y asesorar las actividades de evaluación, gestión y conservación de recursos hídricos en América Latina y el Caribe.
- Apoyar investigaciones sobre el desarrollo científico y tecnológico de los procesos hidrológicos y sus técnicas en zonas áridas, semiáridas, trópicos húmedos y nieve y hielo.
- Formar y capacitar especialistas de la región en las siguientes áreas:
 - + cuantificación de recursos hídricos superficiales y subterráneos
 - + identificación, formulación y gestión de proyectos de desarrollo en el sector ciencias del agua.
 - + intercambio científico y tecnológico de especialistas de la región a nivel rural y urbano y el recurso hídrico.
 - + concientización de la opinión pública y los tomadores de decisiones sobre el recurso hídrico y sus limitaciones.
- Contribuir al fortalecimiento de la red de centros de investigación en hidráulica e hidrología de América Latina y el Caribe.
- Apoyar a la publicación y difusión de documentos científicos y tecnológicos sobre hidrología y recursos hídricos en la región.
- Asistir y asesorar a los países de la región en la formulación y preparación de proyectos extrapresupuestarios en el sector de los recursos hídricos.

ACCIONES

Evaluación, gestión y conservación de recursos hídricos en América Latina y el Caribe (ERH/LAC).

Objetivo específico:

Asistir y asesorar las actividades de evaluación, gestión y conservación recursos hídricos en cada uno de los países que llevan a cabo el balance hídrico superficial, mapa hidrogeológicos y evaluación de actividades nacionales sobre recursos hídricos.

Procesos hidrológicos y sus técnicas (PH/LAC)

Objetivo específico:

Apoyar investigaciones científicas y tecnológicas sobre los procesos hidrológicos y sus técnicas en problemas típicos de la región montañosa, amazónica, llanuras y otros.

Formación y capacitación de especialistas (TRA/LAC).

Objetivo específico:

Formar aproximadamente 200 especialistas de la región cada año en: cuantificación de recursos hídricos, identificación, formulación y gestión de proyectos de desarrollo, intercambio horizontal y cultura hídrica.

Red de centros de investigación en hidráulica e hidrología (RED/LAC).

Objetivo específico:

Contribuir al funcionamiento e intercambio de la red de proyectos de investigación científicas y tecnologías en hidráulica e hidrología y apoyar el establecimiento de bancos de datos a nivel macro/regional.

Publicaciones sobre hidrología y recursos hídricos (PUB/LAC).

Objetivo específico:

Difundir el material científico y tecnológico producido por los especialistas de la región y documentos de relevancia mundial sobre el avance de la hidrología y recursos hídricos en la región.

Proyectos de desarrollo en ciencias del agua (extrapresupuestarios) (PRO/EXT/LAC).

Objetivos específicos:

Asistir y asesorar a los países de la región en el dimensionamiento técnico económico de proyectos y actividades piloto para su implementación a gran escala. Identificar y presentar proyectos a las agencias de cooperación financiera a nivel mundial.

EL CONAPHI Y EL PHICAB

En el contexto de estos objetivos y programas, uno de los que ha significado mayor atención al interior de PHI, ha sido la elaboración del Balance Hídrico Superficial de América Latina. Justamente en el marco de dicho proyecto se tomó contacto con el PHICAB, con quien se elaboró el Balance Hídrico Superficial de Bolivia, así como otros estudios tendientes al conocimiento de los recursos disponibles en el país.

El papel esencial de CONAPHI en este programa, al igual que en muchos otros, ha sido el de facilitar la coordinación entre diversas instituciones del sector, a fin de canalizar en forma adecuada el flujo de información, el asesoramiento, la transferencia de conocimientos. CONAPHI ha tenido, además, oportunidad de intervenir en forma directa en la elaboración de los balances hídricos de varias cuencas del país, y otros estudios realizados al interior del programa, a través del asesoramiento de varios de sus técnicos a los ejecutores de los mismos, así como a través del apoyo a la publicación y difusión de los informes sobre los resultados de los correspondientes trabajos.

Dentro de sus atribuciones el PHICAB tomó contacto con muchas instituciones nacionales, miembros del Comité, a fin de facilitar la obtención de información para el proyecto, el apoyo en distritos donde se requirió el mismo, y en general la participación de éstas en las distintas tareas que llevó a cabo el PHICAB.

CONAPHI brindó también el asesoramiento técnico permanente a los estudiantes egresados, que tomaron parte en el programa, además de procuraes becas - trabajo, a partir de fondos dotados por UNESCO. Asimismo con fondos de la misma naturaleza cofinanció con ORSTOM la edición de diversas publicaciones.

Finalmente se debe expresar, que CONAPHI ha actuado como un catalizador para la elaboración de estudios, proyectos y programas conjuntos, entre instituciones nacionales miembros del Comité e instituciones internacionales. Este aspecto, tan importante para la coordinación interregional y para evitar dispersar esfuerzos tiene su proyección en próximos programas a ejecutarse a lo largo y ancho del país, cuales son cursos de especialización itinerantes, nuevos programas de investigación, participación en la confección de planes a nivel gubernamental, etc.

L'INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION:
ORSTOM

Michel-Alain ROCHE

*Co-Director del PHICAB
ORSTOM, CP 5045, 34032 Montpellier, Francia*

L'Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, denominado ORSTOM, trabaja en la zona intertropical con instituciones nacionales a fin de colaborar al desarrollo.

ORSTOM es una institución pública, bajo tutela conjunta de los Ministerios franceses de la Investigación y de la Cooperación. Es un organismo público, dotado de personalidad civil y de autonomía económica. Cuenta con 1000 investigadores y técnicos.

El papel esencial del ORSTOM es de contribuir al conocimiento científico y a la valorización de los medios físicos, biológicos y humanos. Las investigaciones se hacen en cuatro ejes principales:

- Comprensión del funcionamiento de los ecosistemas y preservación del medio ambiente.
- Condiciones de una agricultura viable a largo plazo en medios frágiles.
- Medio ambiente y salud pública.
- Dinámica de las sociedades y de las economías nacionales.

Según estos ejes de investigación, la organización científica del ORSTOM está compuesta por Departamentos y Unidades de Investigación, en los cuales se agrupan los programas. Entre ellos, existe el Departamento de las Aguas Continentales que estudia las fases terrestres del ciclo del agua. Sus metas generales son entender los procesos de funcionamiento de los sistemas acuáticos, y definir el aprovechamiento de los mismos. Trabaja en particular sobre la base de observaciones de redes climatológicas e hidrométricas, de cuencas representativas o experimentales, desde la escala de parcelas hasta regiones como la Amazonía.

En Bolivia, la primera intervención del ORSTOM fue en 1968 en el marco de un convenio firmado con el Servicio Geológico de Bolivia, para realizar un estudio geológico y estructural de los Andes que se continuó con la participación de la UMSA. A partir de 1981, la firma de convenios con varias otras instituciones bolivianas amplió la cooperación de ORSTOM en diversas áreas científicas.

Actualmente todos los ejes de investigación están representados. La Misión ORSTOM cuenta actualmente 30 investigadores trabajando, en el marco de convenios, con los investigadores e ingenieros de los Institutos de la UMSA y de la UMSS, el SENAMHI, el SHNB, la HAM, el IBTA, YPFB, el IBBA, UNITAS, la USC. Otros investigadores vienen en misiones de corta duración para brindar apoyo en la buena ejecución de ciertos programas. Los temas que se abordan conciernen a la geografía, geología, climatología, hidrología, agronomía, enfermedades tropicales, nutrición, plantas medicinales, y economía.

En el marco del primer eje de competencia del ORSTOM y según los objetivos del Departamento de las Aguas Continentales, se encontró una convergencia de interés de cooperación científica con el SENAMHI y el IHH de la UMSA para estudiar a partir de 1982 el clima y la hidrología de Bolivia, sobre la base de un Programa intitulado PHICAB. La armonización con el PHI de la UNESCO se hizo a través del CONAPHI.

En complemento a las participaciones nacionales, ORSTOM puso a disposición del Proyecto cuatro investigadores y un técnico franceses, asegurando sus sueldos y viáticos.

ORSTOM proporcionó también una parte del material, tales como la informática y medios de trabajos en el campo. A lo largo de los 10 años que duró el Proyecto, aseguró gastos de funcionamiento y equipo que evitaron posibles bloqueos en el avance del trabajo.

Paralelamente a su participación en la elaboración del programa, de resultados, y publicaciones, la contraparte francesa contribuyó al asesoramiento científico de jóvenes bolivianos, en particular en la elaboración de tesis con la contraparte del IHH, y en el campo para técnicos. Colaboró así a la formación de Ingenieros. ORSTOM proporcionó becas en Bolivia y en Francia para esta formación.

ORSTOM tomó a su cargo los gastos de las publicaciones del Proyecto en una colección PHICAB. Publicaciones fueron co-financiadas con la UNESCO, a través del CONAPHI.

EL PROYECTO PHICAB : ESTUDIO DE LA CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGIA DE BOLIVIA

Michel-Alain ROCHE⁽¹⁾, Carlos DIAZ E.⁽²⁾, Freddy CAMACHO V.⁽³⁾, Edgar SALAS R.⁽⁴⁾

- (1) *Co-Director del PHICAB, Institut Français de la Recherche Scientifique en Coopération pour le développement, CP 5045, 34032 Montpellier, Francia.*
- (2) *Director del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, CP 996, La Paz, Bolivia.*
- (3) *Director del Instituto de Hidráulica e hidrología, CP 609, La Paz, Bolivia.*
- (4) *Presidente del Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional de UNESCO, CP 609, La Paz, Bolivia.*

INTRODUCCION

El Programa sobre la Climatología e Hidrología de Bolivia, denominado PHICAB, ha estudiado las variaciones en el espacio y el tiempo del clima y el agua, así como la hidroquímica y el transporte de sedimento en los ríos. El conocimiento de estos factores tan heterogéneos en las diversas regiones del país, es de esencial importancia para los procesos de planificación del desarrollo regional o nacional. Las metas del Proyecto fueron, por ello, generar documentos y resultados de síntesis que faltaban en este área a fin de entender mejor y cuantificar el funcionamiento de las grandes cuencas hidrográficas. Los balances y regímenes de las fases del ciclo del agua, y de las materias en solución y suspensión, con una explicación de los fenómenos directores, constituyeron los grandes temas de investigación científica del Programa.

LAS INSTITUCIONES Y LOS CONVENIOS

El 8 de noviembre de 1982, firmaron en la Cancillería, Mario Canedo Daza y Michel-Alain Roche, en presencia del Canciller y el Embajador de Francia, el primer convenio de cooperación entre el ORSTOM y el SENAMHI para el estudio de la climatología e hidrología de Bolivia, sobre la base de un Proyecto denominado PHICAB. Poco después, gracias a la acción del entonces Director del IHH de la UMSA, Carlos Fernández Jáuregui, esta institución se asoció al convenio para el establecimiento de los balances hídricos de Bolivia. El Proyecto PHICAB se ampliaba así al estudio climatológico e hidrológico de Bolivia.

En el período subsiguiente, los directores sucesivos del SENAMHI, Carlos Díaz Escobar, y del IHH, Roger Mattos Ruedas y Freddy Camacho Villegas, tuvieron con el co-director Michel-Alain Roche una importancia primordial para el buen desarrollo del Proyecto hasta su término.

El PHICAB, por sus temas, se armonizó desde el principio con el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO cuyo objetivo era establecer el balance hídrico de América del Sur, dinamizando la realización de los balances nacionales. El balance hídrico de Bolivia fue así realizado por el PHICAB. Los Especialistas de Programa en la UNESCO-ROSTLAC de Montevideo, Christiaan Gischler y Carlos Fernández Jáuregui, y de los Presidentes sucesivos del CONAPHI-Bolivia, Carlos Fernández-Jáuregui, Roger Mattos Ruedas y Edgar Salas Rada, aseguraron una coordinación eficiente con el PHICAB.

Varias otras instituciones participaron en el Proyecto por convenio: el Instituto de

Investigaciones Químicas de la UMSA (IIQ), la Honorable Alcaldía Municipal de la Paz (HAM), y el Servicio de Hidrografía Naval de Bolivia (SHNB). Cabe agradecer en este punto la cooperación de la Administración Autónoma de Servicios para la Aeronavegación (AASANA), la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE), el Proyecto de estudio del Río Pirai (SEARPI), y el Servicio de la Navegación del Río Mamoré (SEMENA); así como la ayuda brindada por Servicios extranjeros al proporcionar datos de sus zonas fronterizas con Bolivia o de las cuencas bilaterales : La DNAEE de Brasil, la DGA de Chile, los SENAMHI de Paraguay y Perú, y el INCYTH de Argentina.

Se debe mencionar aquí la participación activa de Jacques Bourges y Edgar Salas en la organización de este Seminario de clausura del PHICAB, a quienes expreso mi reconocimiento en nombre de las instituciones participantes del Programa.

Esta manifestación científica del PHICAB, exactamente 10 años después del inicio del Proyecto, es para todos los participantes una gran satisfacción. El Proyecto se clausura oficialmente; pero estamos seguros que el trabajo en el campo de la climatología y la hidrología continuará, a través de la colaboración continua entre instituciones y personas de Bolivia y Francia.

Los resultados que se han presentado en el Seminario, son en realidad sólo una parte de lo logrado. Por eso se presenta al final de ésta publicación, una lista completa de las publicaciones realizadas por el PHICAB que por si misma puede constituir una orientación para cualquier persona interesada en los resultados.

LA CONCEPCIÓN DEL PROYECTO

El programa PHICAB nació en base a conversaciones realizadas entre Michel-Alain Roche, Nestor Abasto, Mario Canedo, Carlos Díaz, y Carlos Fernández Jáuregui. Una misión a través del país entero, realizada por los dos primeros, permitió conocer los aspectos climatológicos e hidrológicos nacionales en su conjunto, precisar el programa y los medios humanos y presupuestarios necesarios, con vista a presentar, a ORSTOM y las Instituciones bolivianas, una propuesta de programa científico en cooperación (Roche, 1982).

Bolivia es uno de los pocos países donde se encuentra todos los climas de la zona intertropical, y aún más, a medida que se asciende se encuentra una gama de climas hasta el clima polar. Por supuesto, se sabe que cualquier actividad de un país es dependiente del clima y el agua. Sin embargo, en Bolivia, esto aparece como una realidad drástica y cotidiana que nadie no puede ignorar.

Además de la variabilidad espacial del clima, muchos lugares del país presentan climas irregulares a lo largo del año o variaciones climatológicas grandes e imprevisibles que constituyen una ventaja o un inconveniente, e incluso pueden originar situaciones de emergencia nacional. A causa de estas condiciones básicas, se observan también condiciones muy contrastadas de escurrimiento de las aguas superficiales, según las cuencas y las épocas. De este modo, las variaciones del clima y de la disponibilidad de agua, en el espacio y en el tiempo, son factores que deben tomarse en cuenta en forma imprescindible para cualquier planificación de desarrollo regional o nacional.

Lastimosamente, en la actualidad, por falta de documentos generales sobre la climatología e hidrología, es bastante difícil disponer de documentos sinópticos sobre las distribuciones espacio-temporales para el conjunto del país. Hasta hace poco se contaba sólo informes, más o menos recientes, sobre cuencas aisladas de los Andes, preparados para proyectos específicos, pero ninguna obra sobre las grandes cuencas y el conjunto nacional. Hacía falta más conocimientos y documentos de síntesis, así como datos depurados y resultados utilizables para fines múltiples y en particular para aplicaciones a proyectos de desarrollo. Parecía también muy importante entender mejor el funcionamiento del régimen climático y la hidrología de las grandes cuencas hidrográficas a fin de sentar bases ciertas para una gestión racional de los recursos naturales renovables.

EL MARCO TEMATICO DEL PHICAB

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el Proyecto PHICAB se encargó de realizar estudios de la climatología, la hidrología, la físico-química y el transporte de sólidos en los ríos de las grandes cuencas hidrográficas en Bolivia. Los dos primeros años se limitó a la cuenca amazónica (Roche, 1982; Roche y Canedo, 1984), y posteriormente se extendió a toda Bolivia, con un programa precisado en su oportunidad, en un anexo al convenio, elaborado 1984 y en la primera renovación de convenio en 1985.

Los estudios contemplaron las grandes cuencas del país : La cuenca amazónica, la cuenca endorréica del Altiplano, y la cuenca del Río de La Plata, incluyendo los Andes y la llanura oriental e intentaron sintetizar al máximo los resultados a escalas adecuadas con la magnitud territorial del país. En este conjunto nacional, se ha brindado particular atención a la cuenca amazónica y la hondada del lago Titicaca.

El Programa, en primera instancia, comprendió trabajos operacionales en una red hidrométrica de la cuenca amazónica para la medición de las alturas de agua y los caudales. Por otra parte, se dedicó al estudio del conjunto de los resultados adquiridos hace años en Bolivia por el SENAMHI, a los cuales se sumaron los datos obtenidos en el marco de dicho Proyecto. Antes de presentar el detalle de cada una de estas tres partes, se mencionará los principales medios que permitieron el funcionamiento del PHICAB.

LOS MEDIOS MATERIALES

ORSTOM puso a disposición del Proyecto parte del material necesario para su funcionamiento. En el campo, se contó con vehículos 4x4, embarcaciones tipo lancha y canoas, motores fuera de borda, aparatos hidrométricos y de mediciones físico-químicas de campo. ORSTOM tomó a su cargo la mayor parte de los gastos de las misiones al campo, que se traducen en decenas de miles de kilómetros de navegación con motor fuera de borde y viajes por tierra.

El Proyecto se estableció inicialmente en instalaciones de SENAMHI para posteriormente instalarse en sus propias oficinas. Para los trabajos de gabinete, ORSTOM puso a disposición del equipo técnico los materiales necesarios, en particular microcomputadoras y sus periféricos.

Los laboratorios del SENAMHI, para la físico-química del agua y análisis de los sedimentos en suspensión, y los del IIQ, para los análisis iónicos, colaboraron en los estudios referentes a la calidad del agua. Además de la participación de estos se contó con la participación de laboratorios franceses para ciertos análisis especializados.

Durante los estudios se utilizaron paquetes de hidrología desarrollados y provistos por ORSTOM (HYDROM, PLUVIOM), cuando estuvieron disponibles, así como paquetes comerciales, como Dbase o Quattro. Es preciso señalar que, al interior del Phicab fueron elaborados muchos paquetes informáticos en sus campos específicos de la climatología e hidrología.

EL PERSONAL

En la contraparte francesa : ORSTOM, el Proyecto fue iniciado en 1982 por un climato-hidrólogo (Michel-Alain Roche) con la ayuda de un técnico (Robert Hoorelbecke). Dos años más tarde, el equipo se ampliaba con la participación de un meteorólogo (Josyane Ronchail), puesto a disposición por el Instituto Francés de Estudios Andinos. A fines de 1985 y en 1986, llegaron un hidroquímico (Jean-Loup Guyot) y otro hidrólogo (Jacques Bourges), ambos de ORSTOM, para ampliar los trabajos comenzados en cada parte del Programa. Cuatro investigadores y un técnico constituyeron así la contraparte francesa del Proyecto.

El SENAMHI por su parte, colaboró en el PHICAB con la participación de su Director y los jefes de los Servicios Meteorológico e Hidrológico, así como la de todo su personal especialista en bancos de datos, y en la preparación y procesamiento de datos. Pusieron a disposición del PHICAB toda la información disponible. También participó en el trabajo de campo con sus técnicos en climatología e hidrología.

El IHH tomó parte activa en el PHICAB, con siete investigadores que participaron en los trabajos de procesamiento e interpretación, cada uno en su especialidad.

El CONAPHI al margen de haber coordinado las actividades del programa con homólogos a nivel continental, lo hizo a nivel nacional, facilitando la buena marcha del proyecto e involucrando a varias instituciones miembros del Comité en el programa. Asimismo apoyó, mediante becas, la participación de estudiantes de la UMSA en el PHICAB.

LA FORMACIÓN DE PERSONAL

El PHICAB contó también con la participación de quince estudiantes egresados de la UMSA, quienes, a través del IHH, elaboraron su tesis en el marco del PHICAB, cada uno durante un período promedio de dos años. Se beneficiaron, con becas ORSTOM o de UNESCO, de una formación práctica mientras que ellos aportaron una gran cantidad de trabajo y de resultados al Proyecto.

Adicionalmente, dos estudiantes bolivianos se beneficiaron de becas locales en el Proyecto, y fueron contratados por el SENAMHI. Uno de ellos continuó su formación en Francia, en el Laboratorio de Hidrología ORSTOM y la Universidad de Montpellier durante un año, gracias a una beca otorgada por el Ministerio francés de Relaciones Exteriores. Un segundo Hidrólogo del SENAMHI siguió después esta misma formación.

Gracias a esta formación en el campo de la investigación, el PHICAB proporcionó medios de capacitación útiles al desarrollo de Bolivia. Es satisfactorio saber que actualmente, jóvenes participantes del PHICAB han obtenido sus títulos de ingeniero y prosiguen una exitosa carrera profesional en campos dedicados al estudio del clima y los recursos hídricos.

Así, el PHICAB se compuso de un equipo internacional con profesionales de múltiples especialidades, en el que cada institución, cada persona implicada, aportó su eficiente contribución. La lista de publicaciones muestra con más detalle la contribución de cada uno.

Sin embargo, más allá de los resultados, debe enfatizarse que PHICAB fue a lo largo de una década, antes que nada, un gran éxito de relaciones humanas. Sólo por eso, los organismos participantes así como las personas implicadas pueden estar orgullosos de haber logrado la más valiosa meta.

CLIMATOLOGIA

El estudio de las distribuciones espaciales y temporales de los parámetros climatológicos en Bolivia se hizo en la base del trazado de un conjunto de mapas, y varios tipos de análisis por tablas y estudios estadísticos de datos ya elaborados.

La obtención de datos elaborados se hizo a través de la homogeneización previa de los datos originales mensuales o anuales, es decir la reconstitución de series completas y depuradas. Fue llevado a cabo, mediante un trabajo importante en el marco de las tesis sobre la climatología y los términos climatológicos de los balances hídricos de las grandes cuencas. Después de haber utilizado un método clásico a nivel anual (UNESCO, 1982), un paquete informático programado en el PHICAB (Roche, 1988) permite finalmente la homogeneización automática de ciertos datos, como los de precipitaciones. Este fue en particular utilizado para el estudio climatológico del lago Titicaca (Roche et al., 1991). El referido paquete proporciona, además, series de resultados regionales directamente utilizables para el estudio

de la variación temporal del clima en el conjunto del país.

Otros paquetes al interior del PHICAB fueron programados para el cálculo mensual del balance de radiación, y de la evapotranspiración por varias formulas, a partir de datos climatológicos (Roche, 1988; Campos, 1990).

Los parámetros más analizados, en el estudio climatológico, fueron los que entran directamente en el cálculo del balance hídrico, es decir lluvias, temperaturas y la evapotranspiración real a nivel anual, de las grandes cuencas, con el trazado de mapas escala 1:1.000.000 (Mariaca, Garcia, Lozada, Espinoza, 1985; Abasto, Cruz, Herbas, 1987; Arellano, 1988; Frías, 1989; Campos, 1990). A nivel de Bolivia y zonas fronterizas estos documentos son sintetizados en una escala 1:4.000.000 y 1:5.000.000 (Roche y Rocha, 1985; Roche et al., 1989, 1990, 1991).

Se elaboraron también otros mapas temáticos como los de temperaturas mínimas y máximas, humedad relativa, velocidad y dirección de vientos, presión atmosférica, nubosidad, evaporación sobre tanque (Herbas, 1987; Campos, 1990). A nivel mensual, se trazaron mapas para los meses de enero y julio en las cuencas de los ríos Grande y Beni (Herbas, 1987; Campos, 1990).

Un paquete informático del PHICAB permite transcribir sobre ploter los datos climatológicos mensuales y anuales de estaciones sobre fondo del mapa de Bolivia (Roche, 1988). Los mapas obtenidos permitieron una mejor definición y comprensión de las distribuciones de las diferentes variables, y se puede catalogar como uno de los resultados más importantes de esta parte del Proyecto.

Después de haber situado a Bolivia en el contexto meteorológico mundial y sudamericano (Roche, 1986), los fuertes gradientes de precipitación fueron explicados por la dinámica de las grandes masas de aire que interfieren sobre el país. El papel muy marcado de la orografía y de las superficies de agua de los lagos y salares fue también destacado (Roche et al., 1989, 1991).

La variación temporal de los parámetros fue sobre todo estudiada a nivel anual y mensual, sin embargo ciertos trabajos llevaron a cabo estadística sobre lluvias diarias, estableciendo además gráficos de probabilidad, mapas de frecuencias de lluvia y curvas de diferentes tipos, tal como las de intensidad-duración-frecuencia (Herbas, 1988; Campos, 1990). Estos resultados permitieron evaluar en cada punto o cuenca valores de precipitación y establecer relaciones con los escurrimientos, eslabón indispensable para la evaluación de los recursos hídricos.

Una parte del estudio climatológico se focalizó especialmente en las variaciones y anomalías climatológicas que ocurren en Bolivia, en relación con diferentes situaciones meteorológicas que fueron identificadas (Ronchail, 1985, 1986, 1989). Estas situaciones fueron explicadas sobre la base de mapas de presión atmosférica de Sudamérica y se analizaron sus efectos sobre las lluvias y temperaturas. El fenómeno de la transgresión de los frentes polares hacia el norte fue estudiado (Ronchail, 1986, 1989).

Relaciones del clima boliviano con el fenómeno del Niño, tal como la sequía en el Altiplano de 1982 y las fuertes lluvias en el Oriente, fueron puestas en evidencia.

HIDROLOGIA

Instalación de una red de estaciones para la observación de las alturas de agua y caudales en los ríos amazónicos.

El PHICAB tomó a su cargo la instalación y mantenimiento de una red de estaciones hidrométricas, a fin de observar las alturas de agua y caudales en los grandes ríos de la Amazonía (Roche, 1982; Roche, 1984; Abasto et al., 1985; Roche et al., 1986; Bourges,

1986). Trece estaciones, en algunos casos duplicadas, fueron observadas y se establecieron las relaciones entre altura y caudal, mediante mediciones de caudales con molinete, gracias a campañas de campo bimestrales en los ríos.

El PHICAB ha obtenido una serie de datos de diez años en una región cuya hidrología estaba poco conocida al inicio del Proyecto. Es preciso señalar que se prosiguió con la observación de tres estaciones previamente instaladas, con lo que se tiene un registro de un período de unos 20 a 30 años, de tal manera que los valores obtenidos, del conjunto de la cuenca, pueden ser ampliados sobre la base de estas series más largas (Roche et al., 1986, Roche, y Fernández, 1987; Bourges et al., 1987, 1988).

Se constituyó un banco de datos hidrométricos primero con el paquete PHICABQ, reemplazado posteriormente por el HYDROM. La interpretación fue efectuada esencialmente utilizando QUATTRO, DIXLOIS, y otros paquetes elaborados en el Proyecto (Carrasco, 1990).

Balances hídricos

La elaboración del balance hídrico de Bolivia fue realizada en como continuación de los estudios climatológicos, relacionándolos con el escurrimiento.

Al comienzo de estos estudios, se disponía de pocos resultados de caudales en comparación con el importante número de sub-cuencas tratadas.

Uno de los objetivos del balance es poder lograr un valor del escurrimiento sobre la base de las evaluaciones de lluvia y evapotranspiración. El interés fue también comprobar los valores de ETR obtenidos por el cálculo mediante fórmulas y por el balance, cuando se contaba con valores de caudales observados.

Teniendo en cuenta la escasez de datos en determinadas zonas, fue un desafío pretender ampliar las evaluaciones a la totalidad de una región de más de un millón de kilómetros cuadrados. En efecto, por primera vez y gracias a la metodología empleada, fue posible conseguir sistemáticamente valores para todas las cuencas, incluso para las cuencas binacionales.

La regionalización del balance hídrico tiene como contrapartida conducir a un margen de error probablemente importante en algunas cuencas con escasos datos o con datos de calidad insuficiente. Sin embargo, métodos desarrollados y puesto a punto durante la realización de los trabajos permiten emprender nuevas evaluaciones, con series de datos más largas, obtenidas por observación en los últimos años.

Ocho tesis sobre el tema detallaron el estudio de las grandes cuencas de Bolivia (Mariaca, García, Lozada, Espinoza, 1985; Abasto, Cruz, 1987; Arellano, 1988; Frías, 1989). Periódicamente, en varios estadios de su avance, el conjunto de los resultados fueron presentados por grandes regiones y Bolivia en su totalidad (Roche y Fernández, 1986, 1987; Fernández et al., 1987; Roche et al., 1986) hasta la síntesis final (Roche et al., 1992).

Los balances hídricos de las diferentes cuencas fueron realizados con la metodología preconizada por la UNESCO, mejorada en la actualidad por un paquete informático que permite realizar los procesos de datos de manera automática en su casi totalidad. La nueva herramienta de regionalización de los datos climático-hidrologías fue utilizada para actualizar el balance hídrico de la hondonada del lago Titicaca.

Se dispone hoy, además de documentos detallados por cuencas, de un documento sinóptico de toda Bolivia y cuencas fronterizas, permitiendo evaluar y comparar en cualquier punto o cuenca, los principales términos del ciclo del agua.

Los regímenes hidrológicos

Los estudios hidrológicos se prolongan por el estudio de los regímenes. Así un análisis estadístico de las series de datos proporcionan resultados de variaciones temporales, y en particular, probabilidades de alturas y caudales de frecuencias dadas en las estaciones de Bolivia (Bourges, 1986, 1992; Bourges et al., 1992). Particular atención mereció la cuenca amazónica, donde se han utilizado los datos recogidos hasta 1992. Los sitios de presas hidroeléctricas, como la del Angosto del Bala (Carrasco, 1990) y de Cachuela Esperanza (Bourges, 1988) fueron estudiados a fin de establecer el input necesario para obras de desarrollo. El estudio comprende la constitución de un banco de datos hidrométricos con el paquete HYDROM.

FISICO-QUIMICA Y TRANSPORTES SOLIDOS DE LOS RIOS

Cuantificar los recursos hídricos en las cuencas de un país, puede ser insuficiente para un proyecto de aprovechamiento. Es necesario conocer además, la calidad físico-química de las aguas y el transporte de sedimentos que ocurren en los ríos.

Es por ello, que el Proyecto PHICAB estudió las variaciones en el espacio y el tiempo, de las principales características físico-químicas y del transporte de materiales en suspensión en los ríos y realizó la caracterización de los principales medios acuáticos. Se analizaron la salinidad global (conductividad), los iones mayores, la sílice, y se midieron la temperatura, el pH, la turbiedad.

El muestreo se realizó en épocas hidrológicas típicas en la cuenca amazónica y en el Altiplano, así como en forma sistemática y más continua mediante la toma de muestras periódicas, sobre varios años, en las estaciones de la red hidrométrica PHICAB. También se procesaron datos de cargas de sedimentos obtenidos por el SENAMHI en toda Bolivia. En este contexto también se elaboró un estudio de la cuenca del Río de La Plata.

Se establecieron mapas de salinidades, mostrando la distribución de los iones en el conjunto de la cuenca amazónica (Roche et al., 1986; Guyot et al., 1987, 1992). El modo de variación temporal de las salinidades fue identificado en las estaciones y una primera evaluación de los transportes de materia disuelta fue realizada para las tres grandes cuencas. (Roche et al., 1986; Roche y Fernandez, 1987; Guyot et al., 1986, 1987; Barragán, 1990; Guyot, 1992). Se estimó los transportes de sedimentos de éstas, diferenciando los Andes y los Llanos. El estudio dió un gran paso con la defensa de tesis sobre el transporte de sedimentos en el Río Beni (Barragán, 1990) y sobre la hidrogeoquímica de los ríos de la Amazonía boliviana (Guyot, 1992).

CONCLUSION

El PHICAB se acaba, marcando, conforme al gran desafío lanzado hace diez años, un avance importante en el conocimiento del funcionamiento de los grandes sistemas hidrometeorológicos de Bolivia así como en la cuantificación de los recursos hídricos.

El PHICAB contribuyó así mismo, al conocimiento de la climatología e hidrología de Sudamérica y el mundo. Permitió a Bolivia ubicarse en un sitio de relevancia a nivel internacional, en particular en coloquios y conferencias sobre las grandes cuencas del continente.

Los resultados obtenidos, creemos, podrán ser utilizados para proyectos de aprovechamiento de los recursos hídricos, así como en estudios de regiones todavía más amplias tales como la cuenca entera de las Amazonas, el Río de la Plata, o la cadena andina. Una de las tareas para las que se debe aplicar la información generada es la de establecer una estrategia de lucha y adaptación contra las inundaciones y sequías.

Los resultados del PHICAB servirán para planificar la ampliación de las carreteras, de los transportes fluviales, y el desarrollo urbano e industrial. Se utilizarán también para evaluar el potencial hidroeléctrico. Entrarán en la planificación de los recursos alimenticios tan prometedores de los Llanos, tales como la ganadería, muy dependiente de las inundaciones, la agricultura a partir de la previsión meteorológica y la irrigación. Así mismo esta información será útil a los fines de la gestión de los recursos piscícolas cuya biología y biomasa están ligadas estrechamente al clima y la hidrología regional.

Lo que quedará del PHICAB es una lista de más de 130 publicaciones y un banco hidrométrico sobre la cuenca amazónica. También quedará la transferencia de conocimientos y técnicas, de ambos lados, boliviano y francés, y el personal capacitado con una experiencia en el área del clima y la hidrología.

El PHICAB, aún más, quedará como una gran experiencia de cooperación científica entre Bolivia y Francia. Más allá de los resultados concretos, lo que quedará más fuerte en la memoria de los participantes son los lazos de estima y amistad que se establecieron entre amigos franceses y bolivianos a lo largo de estos diez años de trabajo en común.

El PHICAB se clausura, pero sigue la cooperación en la misma área entre ORSTOM, el SENAMHI y el IHH de la UMSA y en permanente coordinación con CONAPHI-UNESCO, a través de otro programa : el PECA.

BIBLIOGRAFIA

Toda la bibliografía completa del Proyecto se encuentra al final de la presente publicación.

El clima

y el agua

ESTUDIO CLIMATOLOGICO DE LA CUENCA ANDINA DEL RIO BENI

Julio B. CAMPOS G.⁽¹⁾, Jorge PEÑA M.⁽²⁾

(1) CP 8406, La Paz, Bolivia

(2) IHH-UMSA, CP 699, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

La cuenca del Río Beni tiene dos regiones bien diferenciadas: La primera se desarrolla parcialmente en la Cordillera Oriental y las serranías del subandino hasta el Angosto del Bala. La segunda región abarca el curso del río Beni en la zona de los llanos hasta su confluencia con el Río Madre de Dios en las cercanías de Riberalta.

El estudio se limita a la zona Andina y se circunscribe a evaluar las diferentes variables, elementos fundamentales para analizar su fenomenología, mediante la climatología analítica. Considera también aspectos básicos de climatología dinámica para explicar el comportamiento global de los fenómenos atmosféricos en la región para, posteriormente, caracterizar el clima de la cuenca mediante los métodos propuestos por W. Köppen y Thornthwaite, y clasificar las clima - regiones de acuerdo a convenciones internacionales.

LOCALIZACION Y EXTENSION

Geográficamente la cuenca Andina del Río Beni, conforme al mapa topográfico, abraza una gran extensión del departamento de La Paz, parte del de Cochabamba y una pequeña superficie del departamento del Beni. La región en estudio está comprendida entre los paralelos 14°02'30" - 17°38'57" de latitud sur y 66°04'27" -69°15'08" de longitud oeste, y se desarrolla sobre un área de 67160 Km². correspondiéndole el 6.11% del territorio nacional.

Las altitudes varían notablemente, siendo el Nevado Illampu la máxima elevación con 6420 m.s.n.m. mientras que el Angosto del Bala se sitúa a 284 m.s.n.m. La Figura 1 indica estas variaciones. La altura media, de 2300 m., siendo que la mayor proporción areal (18189 Km²) está comprendida entre las cotas 1000 y 2000 msnm.

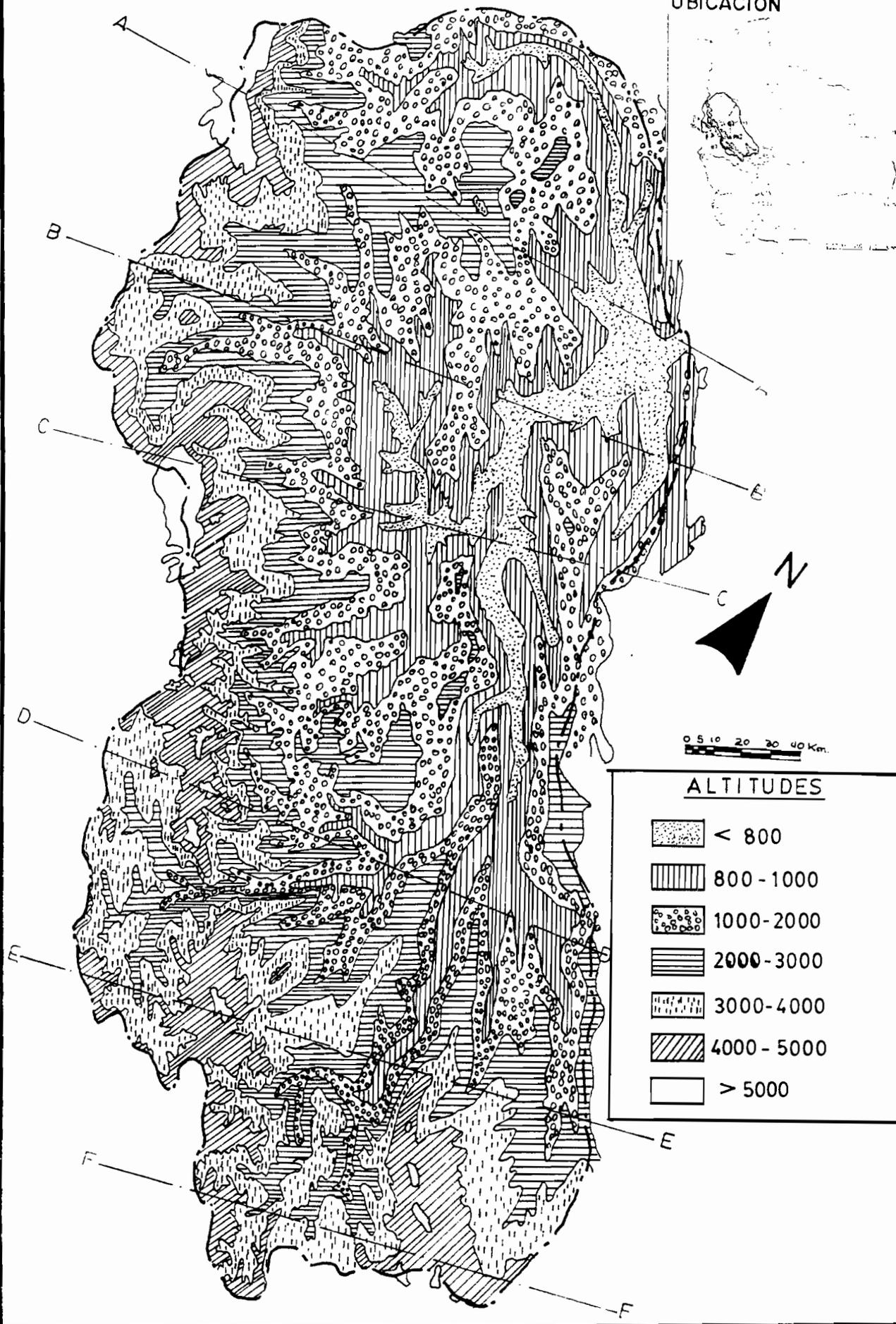
Las características de la cuenca estudiada se pueden sintetizar como sigue :

Area de drenaje	A =	67160 Km ²
Perímetro	P =	1262 Km.
Altura media	Hm=	2297 msnm
Indice de Compacidad	K =	1.36

La variabilidad orográfica de la cuenca es determinante en la definición del régimen climático, puesto que la cuenca Andina del Río Beni al estar situada en la region Sub-tropical, debería responder a las características climáticas de una zona Sub-tropical, situación que no es efectiva. Por esta razón se ha empleado el término "topoclimático" que describe y refleja la relación entre clima y topografía que existe en la zona de estudio.

FIG. 1 CUENCA ANDINA DEL RIO BENI : RANGOS DE ALTITUDES

UBICACION



HIDROMETEOROLOGIA

El fenómeno más importante en las latitudes intertropicales, entre las que está comprendido nuestro país, alude a la circulación de los Alisios, vientos lentos y espesos que vienen del Este desde el Atlántico y de la Amazonía, estando por tanto cargados de humedad.

Los alisios que circulan en los dos hemisferios se encuentran en la Zona de Convergencia Intertropical (Z.C.I.T.), zona de ascensión constante de las masas de aire caliente y húmedo gracias a la alimentación, asegurada por los vientos ya citados. Por esta razón se trata de la estudiada de una zona de mucha precipitación. La Z.C.I.T. se desplaza aproximadamente hacia los lugares de mayor radiación solar durante el año.

En el invierno del hemisferio Sur (Austral), la Z.C.I.T. se sitúa hacia el norte del Ecuador y esto origina la estación seca en Bolivia; mientras que en el verano austral el movimiento de dicha zona es hacia el sur y por ende se tiene la estación húmeda en el país. Vemos entonces que la circulación atmosférica explica el régimen anual de las precipitaciones y de su distribución espacial en Bolivia.

Las elevaciones de la Cordillera Oriental sirven de barrera natural para que se descargue en esas regiones la humedad transportada desde el Este, siendo el Chapare la región de mayor pluviosidad en el país, quedando muy cerca de esta zona, los valles cerrados de Cochabamba con pluviosidad mucho menor. Las variaciones fenomenológicas de las variables climáticas son las siguientes:

PRECIPITACION

En el período de estudio (1968-1984) se ha identificado la ocurrencia de años muy lluviosos (1979 y 1984), y años muy secos (1969 y 1983).

Se han podido identificar tres épocas características de regímenes de pluviosidad mensual, así tenemos:

- Época Húmeda: Enero, Febrero, Marzo y Diciembre.
- Época de Estiaje: Mayo, Junio, Julio y Agosto.
- Época de Transición: Abril, Septiembre, Octubre y Noviembre.

La distribución espacial de la precipitación indica que la pluviosidad es mayor en las zonas cercanas al llano beniano (2367.6 mm año⁻¹ Angosto del Bala) y la zona situada a los pies del nevado Illampu (Curupampa 1219 mm año⁻¹) hasta la región de Guanay (1474 mm año⁻¹). Otras zonas con precipitaciones importantes son Los Yungas e Inquisivi (Estaciones de Chulumani e Inquisivi con 1373 y 1752 mm/año respectivamente).

En la región de Santa Elena- Altamachi (zona vecina a la Cuenca del Mamoré), en la que se carece de estaciones, la inexistencia de registros ha sido superada por la información proporcionada por el mapa ecológico y el estudio dedicado al balance hídrico de la cuenca del río Mamoré.

Las cordilleras de La Paz y de Tres Cruces influyen para que en las zonas situadas a sotavento de los vientos del Este, regiones comprendidas entre estos ramales y el altiplano, tengan valores de precipitación comprendidos entre 560 y 371 mm año⁻¹ y acontecen principalmente en los valles secos de Luribay, Araca y Caracato en La Paz.

Según los valores de número de días con lluvia, Enero y Junio representan los meses con mayor y menor precipitación respectivamente. En la mayoría de estaciones tanto de las zonas bajas, zonas del subandino - Yungas y grupos localizados en las cercanías de la cordillera real, este hecho se confirma al determinar el comportamiento mensual ya citado.

TEMPERATURAS

Las temperaturas que se han considerado características son: temperatura promedio, temperatura máxima promedio y mínima promedio, tanto anual como mensual.

La influencia de la variación de altitudes se comprueba también en este caso, verificándose la existencia de las mayores temperaturas (con valores entre 25.7 °C y 22.4 °C) en las regiones cercanas al llano beniano, situadas en la porción oriental de la cuenca y con altitudes que no superan los 1000 msnm . Las regiones de Los Yungas e Inquisivi, situadas en altitudes mayores a los 1500 msnm, registran valores cercanos a los 19 °C. Finalmente en las zonas cordilleranas y cercanas a ésta se presentan las menores temperaturas (14.2°C y 10°C), comprobándose así la relación inversa entre altitud y temperatura.

Las variaciones mensuales que ocurren en el transcurso del año confirman la variación sinusoidal de la temperatura, con picos de máxima y mínima para los meses de Enero y Junio respectivamente; muy cercanos a los días de los solsticios de verano e invierno. La influencia de la posición del planeta respecto del sol explica también este comportamiento.

HUMEDAD RELATIVA, PRESION ATMOSFERICA Y ACTIVIDAD EOLICA

Las variaciones espaciales de la humedad relativa están influenciadas por la presencia de barreras naturales que se levantan en zonas intermedias de la cuenca y cambian su comportamiento, en el caso de que no existieran estos accidentes, toda la cuenca tendría porcentajes elevados de humedad relativa, originados principalmente por las masas húmedas que proceden del este. Se puede observar esta situación, por ejemplo, en el Norte de la Cuenca, pues desde el llano (81.3% en el Angosto del Bala), hasta la Cordillera de Apolobamba (83.5% en Pelechuco) no existen **barreras montañosas de elevaciones importantes** y es la zona con mayores rangos de humedad relativa.

Los rangos de humedad relativa son también elevados en la zona de los Yungas (80.5% en Coroico), en Inquisivi (75% en Chorocona) y la región de Santa Elena Altamachi. Esto se debe a que los ramales de la cordillera Oriental se constituyen en obstáculos que hacen que la humedad no pase hacia las otras laderas en las cuales predominan valores menores de humedad, tal es el caso de los valles secos de La Paz y Cochabamba. (57.7% en La Paz y 63.1 en Independencia).

Los valores de la humedad relativa en el transcurso del año no presentan variaciones significativas en las regiones de elevada humedad, pero éstas son de importancia en las zonas altas de la cuenca, donde los cambios son notorios para los meses que están comprendidos en la época de estiaje.

Las pocas estaciones que registran los valores de presión atmosférica en la cuenca confirman la relación inversa entre presión y altitud, el perfil barométrico elaborado al respecto confirma la afirmación. Por otra parte es preciso señalar que las variaciones mensuales no son importantes.

Se han considerado los vientos locales como posible influencia para un análisis de relación con la precipitación, pero no se pudieron obtener resultados que expliquen los movimientos de la atmósfera en la región. Algo que puede considerarse rescatable es la comprobación de la influencia del movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical y la circulación de los vientos Alisios de nuestro hemisferio para explicar las variaciones estacionales de la precipitación en la cuenca.

INSOLACION - RADIACION SOLAR Y NUBOSIDAD

El comportamiento de las horas en que ha lucido el sol (Insolación) se registra solamente en estaciones situadas en la zona Nor-Este de la cuenca. Para esta región se establece la

relación temperatura - radiación solar, ambos en valores mensuales promedio, comprobándose la fuerte influencia de la posición astronómica del planeta respecto del sol.

La relación precipitación - nubosidad pone de manifiesto que el fenómeno de insolación sigue el mismo patrón de comportamiento detectado para la precipitación en cuanto a variación estacional se refiere, es decir al acomodo en las épocas húmeda, seca y de transición entre ambas.

La nubosidad en las regiones cercanas a elevaciones orográficas, o situadas en ellas, presentan fuertes variaciones a lo largo del año, evidenciándose la existencia de cielos despejados, durante los meses clasificados como secos, en las regiones más cercanas al altiplano (3/8 en La Paz). Es de hacer notar que las estaciones situadas en las primeras altitudes de estos accidentes en la región Nor-Oeste tienen los valores más elevados de nubosidad (6/8 en Entre Ríos), situación que se confirma, en la zona de Cabecera de Los Yungas (Unduavi, Chuspipata). La influencia de la cobertura vegetal cobra importancia en estas zonas en cuanto a las variaciones de insolación y nubosidad.

EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION REAL

La evaporación medida en tanques evaporímetros manifiesta un comportamiento también estacional. Las variaciones espaciales de este parámetro no son posibles de generalizar por la escasez de estaciones en que se la registre.

En la región Nor - Este de la cuenca se confirma la alta correlación que se obtiene entre medidas de evaporación en tanque y valores estimados según la fórmula de Penman. De esto se puede afirmar que, por lo menos para regiones con alturas menores a los 1000 msnm y situadas dentro de la cuenca, el uso de esta fórmula es aceptable.

Las regiones que componen la cuenca Andina del Río Beni se diferencian básicamente por sus rangos de altitudes sobre el nivel del mar. Siguiendo esta premisa se puede inferir que el empleo de fórmulas de diversos autores confirman la influencia de la altura sobre la evapotranspiración real, pues todas las que fueron empleadas toman como elementos principales la temperatura el promedio mensual de la precipitación .

Las regiones con mayores valores de evapotranspiración real son las ubicadas cerca a los llanos benianos (1486.9 mm. en Angosto del Bala), o en zonas de influencia de ríos caudalosos (1284.1 mm en Tipuani) así como aquellas zonas cubiertas por vegetación clasificada como bosques siempre verdes (948.4 mm. en Chulumani). En cambio, estos valores (según el método de Thornthwaite) decrecen en las zonas cercanas a la cordillera y sus ramales (370.5 mm. en Luribay y 508 mm en La Paz).

CLASIFICACION CLIMATICA

Se ha efectuado la Clasificación climática de la cuenca mediante los métodos de W.Koppen y Thornthwaite. También se han hecho comparaciones con estudios similares para el país, realizados por García Agreda Viparelli y O. Antezana, observándose que prácticamente no existe discrepancia respecto de los resultados obtenidos por estos autores.

CONCLUSIONES

Ya que el presente estudio se refiere a una zona con características propias, la contribución al conocimiento de su régimen climático es válida, por cuanto para la caracterización del clima se ha utilizado un buen número de estaciones y se ha efectuado un análisis en detalle.

Es preciso, es este acápite, resaltar el trabajo de quienes elaboraron el Mapa Ecológico

Tabla .2 Clasificación Climática según Thornthwaite

COD	ESTACION	P. an	t. an.	ETP	Ih	Iu	Ia	Et.	C. ver.	Vegetación	Clima
356	Apolo AASANA	1723.0	20.3	929.0	85.0	85.0	0.0	92.9	36.9	Bosque	B ₄ r B' ₄ a'
446	Irupana	1433.0	20.5	848.0	69.0	69.0	0.0	84.8	37.3	Bosque	B ₃ r B' ₂ a'
010	Rurrenabaque	2550.0	25.9	1546.0	65.0	65.0	0.0	154.6	39.1	Bosque	B ₃ r A' a'
357	Apolo SENAMHI	1323.0	20.5	943.0	42.0	44.0	3.9	94.3	37.5	Bosque	B ₂ r B' ₄ a'
413	Chulumani	1373.0	20.5	949.0	45.0	45.0	0.0	94.9	38.2	Bosque	B ₂ r B' ₄ a'
164	Independencia	954.0	12.5	653.0	47.0	49.0	3.4	65.3	39.5	Bosque	B ₂ r B' ₁ a'
004	Angosto del Bala	2367.6	25.5	1487.0	59.0	59.0	0.0	148.7	40.1	Bosque	B ₂ r A' a'
551	Tipuani	1901.0	24.2	1284.0	48.0	48.0	0.0	128.4	36.0	Bosque	B ₂ r A' a'
186	Misicuni	656.0	6.8	547.0	20.0	22.0	2.0	54.7	41.9	Bosque	B ₁ r C' ₂ a'
191	Morochata	868.0	11.7	363.0	40.0	45.0	8.4	63.6	37.5	Bosque	B ₁ r B' ₁ a'
012	San Borja	1883.0	26.1	1595.0	20.0	22.0	3.8	159.5	39.5	Pradera	C ₂ r A' a'
524	Vivero Sapecho	1495.0	24.9	1383.0	9.0	12.0	3.4	138.3	40.5	Pradera	C ₂ r A' a'
518	Coripata	1031.0	19.7	897.0	17.0	20.0	4.5	89.7	37.7	Pradera	C ₂ r B' ₃ a'
523	Sorata	799.0	14.8	706.0	22.0	35.0	21.5	70.6	35.7	Pradera	C ₂ s B' ₁ a'
586	San Calixto.	572.0	10.7	315.0	1.0	13.0	19.5	61.5	37.7	Pradera	C ₂ s B' ₁ a'
405	Central La Paz	561.0	11.4	630.0	-3.0	8.0	19.4	63.0	37.7	Pradera	C ₁ d B' ₁ a'
505	Paica	434.0	11.9	641.0	-19.0	0.0	32.2	64.1	39.5	Pradera	C ₁ d B' ₁ a'
467	Luribav	370.0	17.4	795.0	-32.0	0.0	534.0	79.5	38.6	Estepa	D d B' ₂ a'

ETP = Evapotranspiración potencial anual [mm] Ih = Índice Hídrico Iu = Índice de humedad Ia = Índice de aridez

P an = Precipitación total anual [mm] t an = Temperatura media anual [C]

Et = Eficiencia térmica [cm] C. ver = Concentración de verano (%)

FIG. 2 CUENCA ANDINA DEL RIO BENI - CLIMAS SEGUN THORNTHTWAITE



del país, que ha sido de gran apoyo para tener una clasificación climática completa en la cuenca. La inexistencia de estaciones meteorológicas en algunas regiones de ésta ha sido suplida con la observación de las zonas de vida de este mapa, que las define también de acuerdo a la vegetación existente, dando cierta idea de los rangos de precipitación y temperatura, para determinar el clima de esas regiones. Este procedimiento, creemos, es válido y constituye una vía expedita para elaborar estudios similares al efectuado en la presente ocasión.

Es también necesario referir a la elasticidad que tiene el método de clasificación climática de Wladimir Köppen que permitió hacer una distinción del tipo climático de acuerdo al número de meses con valores de temperatura promedio mensual, además de considerar las variaciones del régimen de precipitaciones.

En regiones de altitudes menores a los 500 msnm al Este y Nor-Este de la cuenca, los cursos de agua y la vegetación existente coadyuvan a tener climas cálidos y húmedos durante todo el año.

Al pasar a zonas de mayores altitudes, las que están comprendidas entre los 500 y 2000 msnm, también se tienen climas cálidos y húmedos; pero con precipitaciones escasas durante el invierno. Esta situación se presenta en los Yungas, aunque se tienen variaciones muy localizadas en esta región, que es muy singular, pues presenta zonas de vida del tipo "bp-MST" y "bp-MBST" no frecuentes en estas altitudes.

Otra región muy lluviosa durante todo el año y con énfasis durante el verano es la zona de Inquisivi. Los valores de temperatura de esta zona varían entre 14 y 19 °C lo que implica la existencia de climas húmedos.

En la región Sur-Oeste de la cuenca, se tienen valles secos y encajonados aproximadamente a 2500 msnm, entre los pliegues de la cordillera, en los que se comprueba la existencia de climas de tipo estépico y semiáridos.

Por último, la región oeste de la cuenca, en la zona comprendida entre la cordillera de La Paz y el Altiplano, presenta clima de tipo seco sub-húmedo, con precipitaciones de verano y temperaturas no mayores a los 15 °C. La orientación de las laderas de la cordillera ya citada determinan los rangos de humedad en la región. Todas estas características pueden apreciarse en la figura 2 y la tabla 2. La cadena montañosa de la cordillera Real y otras zonas con altitudes mayores a los 4000 msnm constituyen los climas polares de alta montaña.

BIBLIOGRAFIA

HUFTY A., Introducción a la Climatología, Ed. Ariel, Barcelona 1984, 1ªEd.

CAMPOS J., Estudio Climatológica de la Cuenca Andina del Río Beni, Tesis UMSA, 1990, La Paz, Bolivia.

METEOROLOGICAL INSTITUTE UNIVERSITY OF BONN, General Climatology, Ed. H. Flohn, Ger. 1969, Vol 2/12.

O.M.M., Guía de prácticas hidrológicas, 4ªEd., Vol 2, Ginebra 1986.

RICHMOND-LONGLEY, Tratado ilustrado de meteorología, Ed. Bell, BS. As. 1973.

ANTEZANA O., Climas de Bolivia, La Plata, 1958

GARCIA A.-VIPARELLI, Perfil esquemático del clima y de la hidrología de Bolivia, Roma 1975, IJA-ICH.

APARICIO M., Apuntes de hidrología de superficie, Ed. UNAM, 1985, México.

SPRINGALL G., Hidrología superficial, Ed. UNAM, 1986, México.

LINSLEY-KOHLER-PAULUS, Hidrología para ingenieros, 2ªEd., 1977, Mc Graw-Hill, Bogotá.

ESTUDIO DEL REGIMEN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN LA CUENCA ANDINA DEL RIO BENI

Luis M. CARRASCO N.⁽¹⁾, Jacques BOURGES⁽²⁾

(1) S.H.N.B., CP 5962, La Paz, Bolivia

(2) ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

El Río Beni -que forma parte de la cuenca Amazónica- es uno de los complejos hidrológicos más importantes de Bolivia, tanto por las diversas posibilidades de aprovechamiento que ofrece, como también por su valor como reserva ecológica a nivel mundial.

CARACTERISTICAS DE LA CUENCA

La cuenca del Río Beni está situada entre los paralelos 14°10'-17°42' de latitud Sud y 66°03'-69°15' de longitud Oeste, se extiende sobre una superficie de 68.900 Km², abarcando gran parte del Departamento de La Paz, una parte de Cochabamba y una pequeña superficie del Beni. Su topografía es variada, ya que presenta zonas altas o cordilleranas en sus regiones del Oeste y del Sur, pasando por zonas de transición o valles interandinos, para posteriormente confluir en el Subandino, que es el límite natural con el llano beniano. Por todo ello, no resulta extraño que en la cuenca se tengan marcadas diferencias de altitud, desde los 6420 m.s.n.m. en el Nevado Illampu, hasta los 300 m.s.n.m. en el Angosto del Bala.

En la cuenca existe mayoría de suelos impermeables con escasos suelos semipermeables. Predomina la vegetación que no pierde su follaje en todo el año excepto durante la floración (bosques siempre verdes). En la zona montañosa de ambiente seco, pero con pendientes más abruptas, existen afloramientos rocosos, la vegetación es inexistente, por lo que se les denomina, "Tierras Eriales". Estas condiciones de cobertura abarcan un 15%. En tierras de altura intermedia y en tierras eriales, existen pastos y arbustos aunque en menor porcentaje.

La Zona de Vida predominante en el área de estudio es la ST=SUBTROPICAL que ocupa dos regiones:

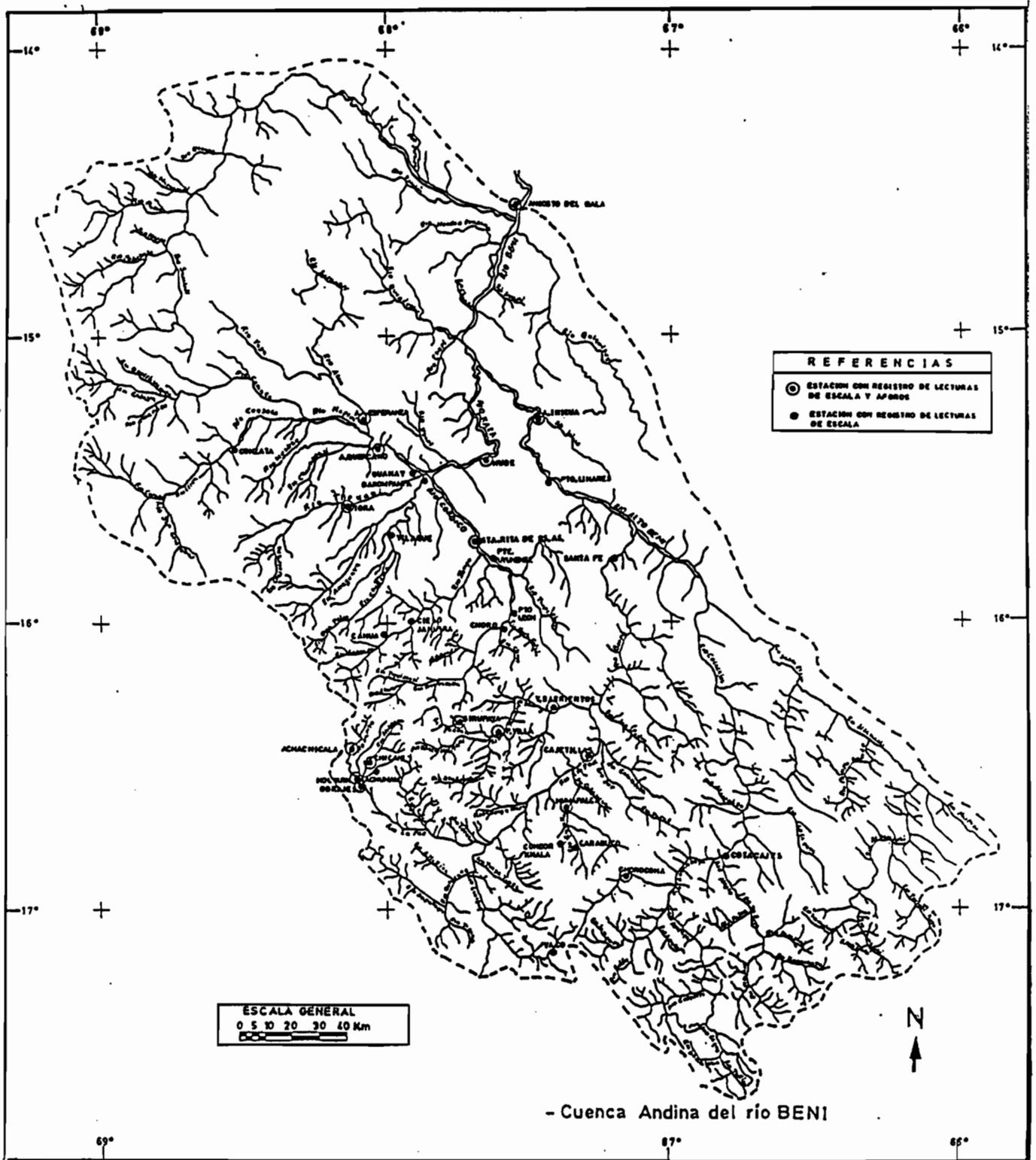
- Región Subtropical de tierras de valles, llamada también "Yungas" y "Faja Subandina", es la más extensa y de ecología más variada en toda la cuenca.
- Región Subtropical Andina, se destacan los valles profundos, valles interandinos y cumbres cordilleranas, muchas de nieves perpetuas, lo que da lugar a numerosos ríos y arroyos.

Las características climáticas más importantes son:

- Un gradiente de temperatura en el eje O-E, en valores medios anuales de 12 a 25 °C y en el eje S-N de 07 a 22 °C.
- La precipitación promedio en el eje O-E varía de 560 a 2360 mm, en el eje S-N, varía desde los 650 a los 1700mm.
- La humedad relativa, varía con la altitud, en el eje O-E varía del 60 al 82% y en el eje S-N de 66 al 77%.

MAPA I

HIDROGRAFIA DE LA CUENCA Y UBICACION DE ESTACIONES



SISTEMA HIDROGRAFICO DE LA CUENCA

Surcada por más de 120 cursos de agua (Mapa I), presenta los siguientes ríos principales: Cotacajes, Santa Elena, La Paz, Tamampaya, Boopi, Alto Beni, Coroico, Zongo, Mapiri, Atén, Kaka, Quiquibey, Tuichi y Beni, que definen unidades hidrológicas, de las que se presenta a continuación sus características morfométricas.

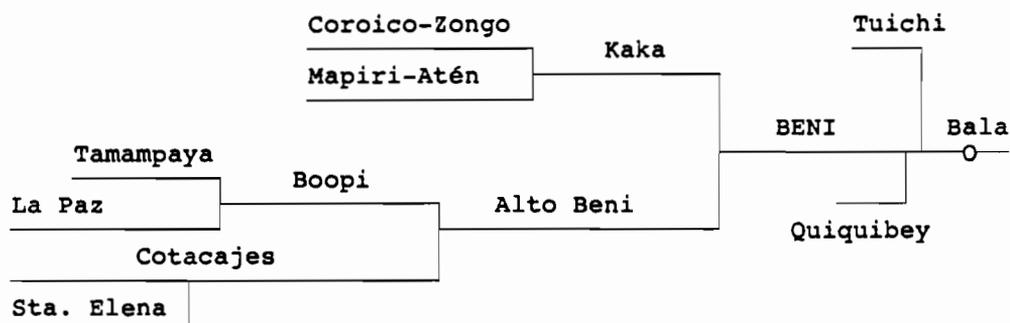
Características Morfométricas por Sub-Cuencas

S-CUENCA	S.ELENA	COTACAJES	LA PAZ	TAMAMPAYA	BOOPI	ALTO BENI	COROICO-ZONGO
Lr (Km)	210	230	160	83	250	372	140
A (Km ²)	5980	8560	7560	2090	12640	31160	5310
P (Km)	431	550	445	191	560	958	319
HM (msnm)	4800	4250	4800	4250	4800	4250	5000
Hm (msnm)	840	840	980	980	750	603	910
Ic	1.5606	1.6645	1.4330	1.1698	1.3947	1.5196	1.2257
L	182.78	239.22	180.65	61.536	223.43	401.36	112.15
l	32.716	35.783	41.849	33.964	56.573	77.635	47.345
R	0.1193	0.1091	0.1358	0.2096	0.1419	0.1241	0.1833
Ff	0.1800	0.1500	0.2300	0.5500	0.2500	0.1900	0.4200
Am	2.3637	2.5856	2.0777	1.3460	1.9873	2.2737	1.5391
Ip	0.1373	0.1218	0.1545	0.1985	0.1273	0.0990	0.1709
Ir	1.9000	1.4800	2.3800	3.9300	1.6200	0.9800	2.9200
Dd	0.1786	0.2280	0.2388	0.3005	0.2385	0.2047	0.2119
Ct	0.0174	0.0215	0.0262	0.0354	0.0278	0.0211	0.0235

S-CUENCA	MAPIRI-TIPUANI	KAKA	QUENDEQUE	HONDO	QUIQUIBEY	TUICHI	BENI(A.BALA)
Lr (Km)	153	231	89	55	121	240	442
A (Km ²)	13200	20460	2130	820	2900	9790	68900
P (Km)	509	670	215	120	263	505	1265
HM (msnm)	3000	3000	1900	1100	1070	5500	4250
Hm (msnm)	910	603	600	450	350	290	284
Ic	1.2405	1.3115	1.3044	1.1734	1.3675	1.4291	1.3519
L	181.95	254.66	81.301	38.944	103.47	204.67	493.38
l	72.546	80.344	26.199	21.056	28.026	47.834	139.12
R	0.1781	0.1585	0.1601	0.2074	0.1468	0.1364	0.1498
Ff	0.4000	0.3200	0.3200	0.5400	0.2700	0.2300	0.2800
Am	1.5837	1.7803	1.7616	1.3600	1.9215	2.0685	1.8832
Ip	0.1169	0.1019	0.1209	0.1087	0.0771	0.1473	0.0947
Ir	1.3700	1.0400	1.4600	1.1800	0.5900	2.1700	0.8900
Dd	0.1534	0.1684	0.1338	0.1317	0.1014	0.1138	0.1700
Ct	0.0109	0.0137	0.0103	0.0061	0.0024	0.0074	0.0153

Lr = Longitud del curso principal	R = Radio de elongación
A = Area de la cuenca	Ff = Factor de forma
P = Perímetro de la cuenca	Am = Alejamiento medio
HM = Altura máxima de la cuenca	Ip = Índice de pendiente
Hm = Altura mínima de la cuenca	Ir = Pendiente media
Ic = Índice de compacidad	Dd = Densidad de drenaje
L = Lado mayor del rectángulo equivalente	Ct = Coef. de torrencialidad
l = Lado menor del rectángulo equivalente	

Para una mejor visión de la distribución de los ríos en la cuenca Andina del Río Beni, se presenta a continuación el siguiente esquema:



RED HIDROMETRICA Y SISTEMATIZACION DE LA INFORMACION.

La Red Hidrométrica, se halla constituida por 10 Estaciones representativas (Mapa I), emplazadas convenientemente en la Cuenca, cada una de ellas cuenta con datos de lecturas de escala y aforos en el período 1973 a 1984.

Los bancos de datos, se crearon con el paquete HYDROM (distribuido por ORSTOM), el mismo que permite un amplio manejo de archivos tanto de lecturas de escala, aforos y curvas de calibración. Mediante la interacción de dichos bancos de datos, se generaron caudales: instantáneos, medios (diarios, mensuales y anuales) y máximos-mínimos (instantáneos y diarios).

Al tener en el período de registros lagunas de información y dado que el escurrimiento superficial, no es un fenómeno local, el relleno de los datos limnimétricos faltantes se realizó por medio de correlación lineal y compuesta, entre estaciones, próximas y/o sobre el mismo curso. Del total de las estaciones en estudio, el 75% de ellas, presenta una variación máxima del nivel de aguas de 4.50 Mts., mientras que el restante 25% presentan una variación mayor, en estas últimas se corrigieron los aforos (medidos en época de crecidas) debido al ángulo que se forma entre el cable que sostiene el escandallo y la superficie del agua.

Las variaciones climáticas, inciden en el régimen de precipitaciones, la presencia de fuertes crecidas en época de lluvias y bajos caudales en época de estiaje provoca fenómenos alternativos de socavaciones y embanques, por ello es posible tener en una estación varias curvas de calibración, que van desde algunos meses hasta varios años.

Al contar con las curvas definitivas para las estaciones de la cuenca, se procedió a realizar la extrapolación de la parte alta mediante 3 métodos; gráfico, area-velocidad media y analítico, para el caso de la parte baja se empleó el método de Johnson/Glusov.

ANALISIS ESPACIO TEMPORAL DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.

Análisis a nivel anual

La distribución del escurrimiento, tanto espacial como temporal, a nivel de los módulos anuales, es caracterizada a continuación :

Angosto del Bala:Angosto Inicua:Nube.

En las tres estaciones en general no se tienen variaciones marcadas con respecto al valor medio, debido al caudal elevado que controlan y a las características topográficas de emplazamiento de cada estación.

Al controlar la variación de un año con respecto al anterior en las tres estaciones se observa claramente que existe gran similitud a excepción del año 82 -en Angosto del Bala- lo que puede explicarse por el hecho de haberse presentado una fuerte crecida en el Bala, la que pudo controlarse convenientemente en dicha estación y no así en las otras dos, otra influencia también pudo provenir de la Sub-cuenca que existe entre A.Inicua-Nube y Angosto del Bala, donde los ríos Tuichi, Quiquibey y Quendque, pudieron haber tenido en ese año un régimen de caudales mayor que el año 1981. De todas maneras al provenir los datos de mediciones hechas en el campo y no como producto del relleno, no puede atribuirse tal variación a otro motivo que no sea físico.

Nube:Santa Rita de Bs. As.:Angosto Quercano.

En general se ve que las marcadas variaciones de un año a otro en Santa Rita, son explicables por la densidad de drenaje y coeficiente de torrencialidad altos de la sub-cuenca y por hallarse en una zona (como los Yungas), de alta pluviosidad.

Los caudales en el Río Kaka son atenuados por la variación gradual de un año a otro en Angosto Quercano (a excepción de 1980), fenómeno que es función del régimen de lluvias y tipo de clima en la zona. Las dos características anteriores unidas al efecto generado por los ríos Tipuani-Zongo (cuya sub-cuenca representa el 30% del total que controla Nube), nos permite tener variaciones no tan pronunciadas con respecto a la media en Nube.

Villa Barrientos:Puente Villa:Sirupaya.

Villa Barrientos se halla emplazada en un lugar rocoso y encajonado, lo que provoca su alta sensibilidad a las variaciones del caudal en el río, a excepción del año 79. La estación se presenta estable y con poca variación respecto a la media, empero en el año citado, se observó, que el nivel del río en dicho punto estuvo por encima de los 2.40 mts. durante los tres primeros meses del año. Esto no sucedió en los años anteriores y posteriores a 79, lo que se explica plenamente ya que ese año se presentó como el más lluvioso para el período en estudio.

En Puente Villa y Sirupaya, no se puede exigir más, debido al lugar y las características pedológicas de la zona. La zona en cuestión presenta suelos fácilmente erosionables, lo que incide en variaciones marcadas del caudal controlado. Esta característica ocasiona que estas variaciones no sean similares a las ocurridas en Villa Barrientos a pesar de ser próximas entre sí y encontrarse en el mismo curso.

Cajetillas:Chorocona.

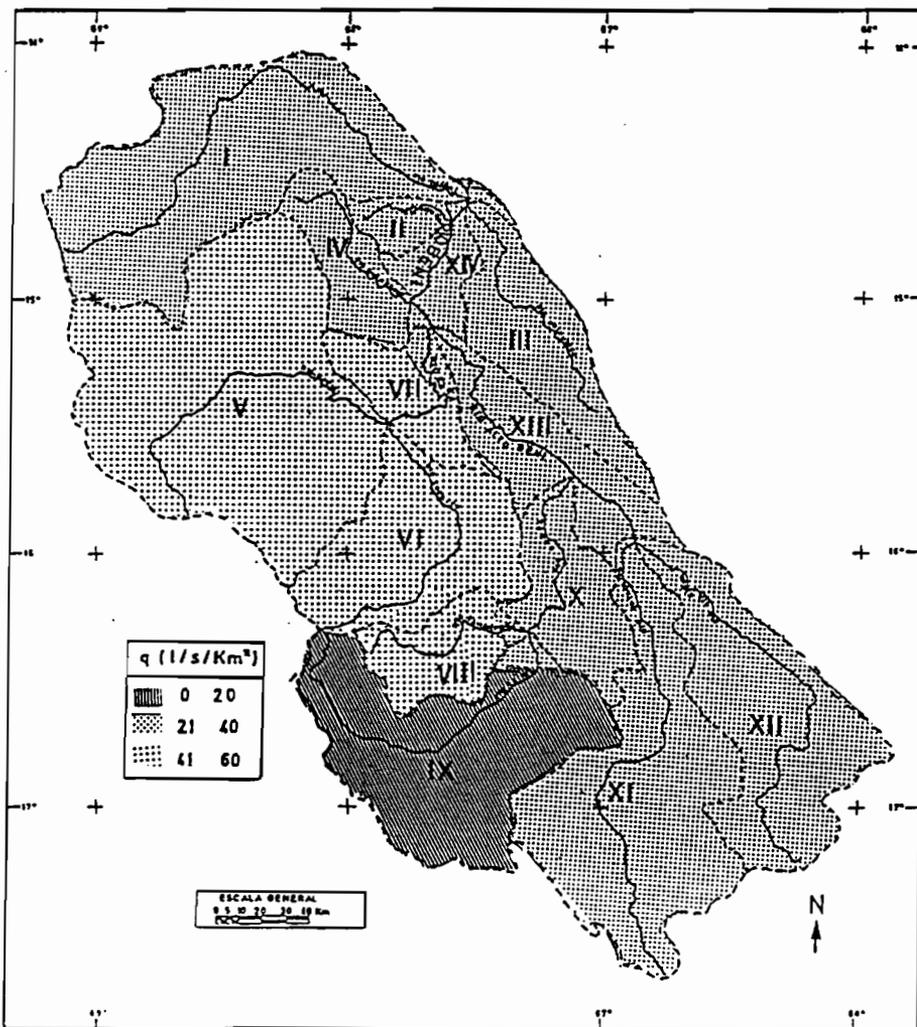
Cajetillas controla una Sub-cuenca, que se caracteriza por la influencia de la topografía, mayor que en el caso de las otras Sub-cuencas. En esta estación, a excepción de los años 78-79, los valores de nivel de aguas fluctúan alrededor del valor medio, por lo que podemos llegar a suponer que en ambos existió una medición de los niveles de agua en exceso. Este extremo no puede ser comprobado debido a que se trata de una estación aislada y que no presenta compatibilidad con las demás estaciones. Los datos obtenidos han sido aceptados como válidos, debido a que el mismo fenómeno de elevado caudal se presenta en los aforos tomados en la estación en los dos años en duda.

En Chorocona se vé que la fluctuación de los caudales respecto del valor medio, no es significativa, a excepción de los años 74, 80 y 83. Esto puede explicarse por su situación geográfica y área de control que es una zona con características de variabilidad del régimen, común a los ríos de tipo torrente, ya que se halla en una quebrada y cabecera de valle.

Caudales Medios Anuales (m^3s^{-1})

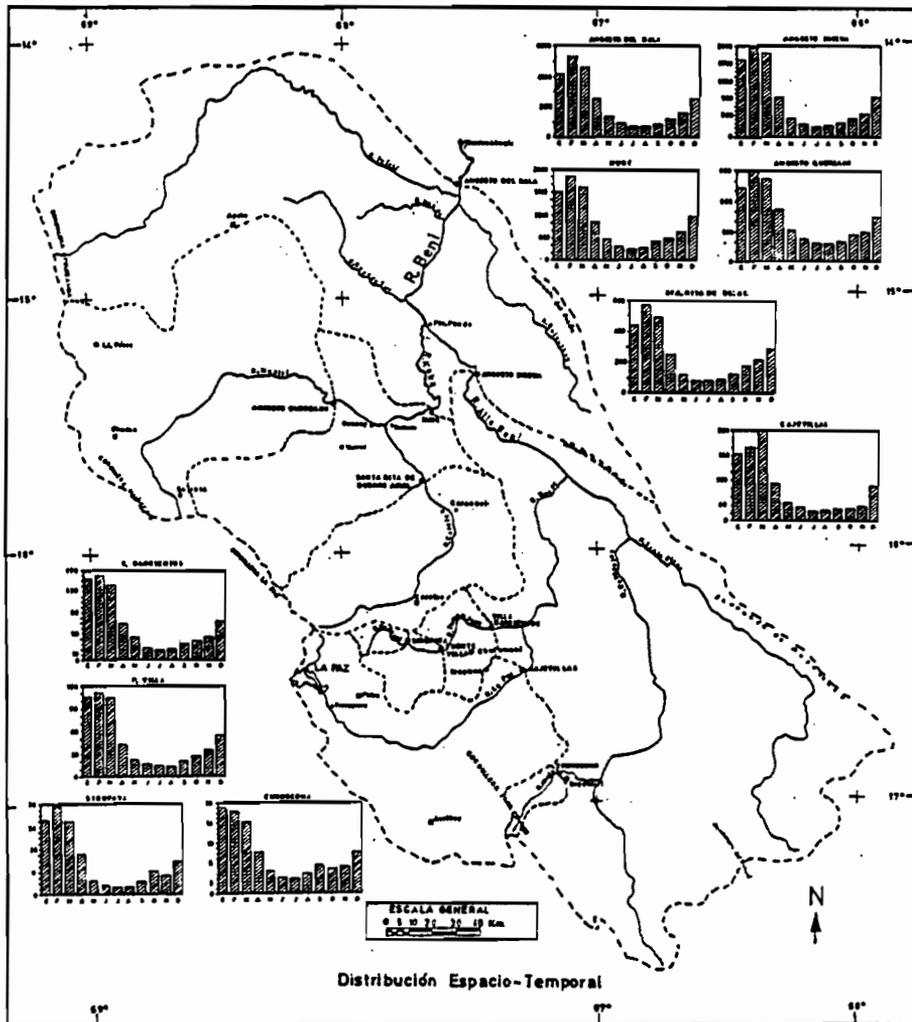
AÑO	BALA	INICUA	NUBE	QUERCANO	S.RITA	V.BARR.	P.VILLA	SIRUP.	CAJET.	CHOROCONA
74	2330	915	1080	444	276	83.5	54.3		113	5.34
75	2440	966	1070	469	236	69.9	49.1		92.6	9.02
76	2130	919	1060	409	216	69.9	50.9		77.3	7.54
77	2240	896	909	404	297	69.1	60.6		79.2	8.50
78	2070	808	837	358	227	77.7	45.9		140	9.92
79	2160	860	901	456	155	85.5	45.8	13.4	95.1	8.61
80	1890	722	842	563	178	68.1	39.7	10.9	47.0	6.93
81	2460	931	1110	457	351	62.7	49.5	15.9	67.3	9.93
82	2600	892	872	406	284	56.7	42.0	10.8	65.4	8.24
83	2000	607	974	280	211	43.6	37.1	8.5	30.3	5.08

Para cada Estación y considerando el período 74-83, se tienen un caudal promedio interanual característico, el mismo que reducido por unidad de superficie, define los caudales específicos. Aplicando éste criterio a las estaciones de la red, se observa (Mapa II), que la zona de los Ríos Mapiri, Coroico y Tamampaya, al ser de mayor pluviosidad, presentan también en promedio el mayor caudal específico ($40-60 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$). La cuenca del Río La Paz se muestra como la de menor ($10-20 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) escurrimiento específico, quedando las restantes sub-cuencas con un valor intermedio ($20-40 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$).



MAPA II
CAUDALES
ESPECIFICOS

REFERENCIAS	
I	S.CUENCA TUPCHI
II	S.CUENCA MONDO
III	S.CUENCA GUNGLESY
IV	S.CUENCA GUNGLESY
V	S.CUENCA MAFISI
VI	S.CUENCA CORICO
V-VI-VII	S.CUENCA KARA
VIII	S.CUENCA TAMAMPAYA
IX	S.CUENCA LA PAZ
VIII-IX-X	S.CUENCA BOOPI
XI	S.CUENCA COTACAJES
XII	S.CUENCA STA. ELENA-ALTAMACHI
VIII-XIII	S.CUENCA ALTO BENI
I-XIV	CUENCA ANDINA DEL RIO BENI



MAPA III
CAUDALES MEDIOS
MENSUALES

Análisis a nivel mensual

Los caudales mensuales, nos permiten visualizar las variaciones del caudal en el año, y con ello caracterizar el escurrimiento superficial a nivel mensual y estacional. Los histogramas en el total de las estaciones (Mapa III), muestran la misma tendencia a lo largo del año. Las diferencias que se observan se ubican fundamentalmente en las estaciones que controlan áreas de más de 5000 Km² y las de menos de 2000 Km². En las primeras, el ciclo de aguas altas se inicia en Noviembre y termina en Mayo, en las segundas se inicia en Diciembre y termina en Abril; en ambos casos, se tiene al mes de Febrero como el de mayor caudal y a Julio como el que presenta menor escurrimiento superficial. DE este modo se define 4 períodos: el de aguas altas de Enero-Marzo, de aguas bajas de Junio-Agosto y de transición de Abril-Mayo y Septiembre-Diciembre.

Caudales Medios Mensuales (m³s⁻¹)

MES	BALA	INICUA	NUBE	QUERCANO	S.RITA	V.BARR.	P.VILLA	SIRUP.	CAJET.	CHOROCONA
ENE	4170	1780	1790	733	441	153	106	26.3	164	17.1
FEB	5300	2060	2210	898	573	160	112	31.1	179	16.4
MAR	4590	1940	1910	824	490	142	105	25.8	217	14.3
ABR	2550	916	1010	525	249	68.9	42.7	14.4	91.0	8.17
MAY	1420	444	580	320	121	44.2	23.0	4.98	45.3	4.56
JUN	958	324	387	232	82.9	24.4	17.7	3.34	33.9	3.19
JUL	753	247	304	184	82.1	19.1	14.9	2.58	26.4	2.91
AGO	746	275	341	181	89.2	21.7	14.2	2.79	28.2	4.04
SEP	899	330	505	202	123	31.7	21.5	4.67	30.9	5.70
OCT	1260	441	614	267	176	36.1	27.7	8.35	31.8	4.99
NOV	1620	547	763	293	215	43.7	35.3	6.80	36.6	5.29
DIC	2520	925	1170	435	284	74.0	54.4	11.7	84.6	8.23

La definición de año hidrológico, se basa en el hecho de que se inicia en el momento en que simultáneamente tanto el caudal como la precipitación dejan los valores mínimos de la época de estiaje e ingresan a la época de lluvias, tal fenómeno sucede a fines de Agosto y principios de Septiembre, por lo tanto el año hidrológico para la cuenca se define de Septiembre a Agosto. La variación mensual además nos muestra que se tendrán: Verano lluvioso, Invierno seco y Primavera, Otoño coincidentes con los períodos de transición.

Análisis a nivel diario

Para las estaciones de la cuenca se determinaron los caudales característicos, que permiten caracterizarlas en cuanto al escurrimiento superficial que controlan y son muy útiles para el diseño de obras hidráulicas. El detalle de los principales caudales característicos, por estaciones (sólo las que presentan años completos), se detalla a continuación:

Caudales Característicos en m³s⁻¹

MES	BALA	INICUA	NUBE	QUERCANO	S.RITA	V.BARR.	P.VILLA	SIRUP.	CAJET.
Qm	2220	846	958	410	236	66.7	48.3	11.7	76.9
Qc	19500	7230	5390	3280	2370	442	394	124	2032
QMc	6960	3100	3070	1260	931	234	189	46.7	351
Q90	3090	1180	1350	545	286	89.9	61.7	14.3	82.6
Q120	2380	838	1080	434	226	64.8	46.9	10.3	57.2
Q150	1910	609	871	356	181	50.5	37.2	8.48	45.8
Qs	1460	472	685	287	146	39.2	29.9	6.55	38.2
Q210	1220	393	569	245	126	33.3	23.9	5.47	33.4
Q240	1010	336	438	208	107	28.2	18.7	4.35	28.4
Q270	837	286	369	183	91.7	23.6	14.6	3.38	24.2
Q300	696	244	301	164	74.6	19.8	11.1	2.77	20.1
Q330	571	196	251	140	59.2	16.9	8.75	2.20	16.1
Qmc	453	149	196	115	44.8	13.1	5.39	1.59	12.0
Qe	333	104	142	65.5	31.7	5.63	0.223	1.01	0.076
A	70010	26680	30210	12930	7442	2103	1523	369	2425
L	1016	892	1541	1368	1600	1113	1603	1392	376

Qm	= Caudal Medio Anual (módulo)	Qmc	= Caudal de los 10 días más secos
Qc	= Caudal Máximo Diario	Qe	= Caudal Mínimo Diario
QMC	= Caudal Igualado/superado en 10 días del año A	A	= Aportación Media Anual (Hm ³)
Qi	= Caudal Igualado/superado en i días del año	L	= Lámina Escurrida (mm)
Qs	= Caudal semipermanente (al 50% del tiempo)		

ANALISIS ESTADISTICO

La difícil tarea de la planeación y diseño de obras hidráulicas está siempre relacionada con eventos hidrológicos futuros. La base de todo estudio hidrológico son los datos medidos sobre las diferentes variables que intervienen en la planificación, diseño y operación de obras de regulación, protección y aprovechamiento de los recursos hídricos de una región, por ello el camino estadístico es el más viable para obtener los resultados que se requieren, los que generalmente tienen que ver con eventos a producirse en el futuro y bajo ciertas condiciones límite.

Cada uno de los datos obtenidos, representa un evento, el que puede ó no repetirse en el futuro, las condiciones necesarias para la ocurrencia ó no del evento, se cumplen por una ley de probabilidad que dará en general, con que frecuencia se presenta el evento, dadas ciertas condiciones. Como el escurrimiento en un río es una variable aleatoria continua, se emplearon funciones continuas de distribución de probabilidad para el análisis estadístico de los datos.

El análisis estadístico se realizó a nivel anual, mensual y máximo instantáneo y para el tratamiento de los datos se empleó un programa de amplia aplicación hidrometeorológica (M.C.M. ver 1.0) que permitió realizar cálculos simultáneos, incluyendo fórmulas complejas sin restricción.

Los resultados del análisis estadístico, pueden ser resumidos en las siguientes tablas:

Estadísticos de las series de Caudales Medios Anuales

ESTADÍSTICOS	A.B.	A.I.	N.	A.Q.	S.R.	V.B.	P.V.	SIR.	CAJ.	CHO.
N° de datos	10	10	10	10	10	10	10	5	10	10
Media Aritmética	2232	852	966	425	243	68.7	47.5	11.9	80.7	7.91
Media Geométrica	2222	844	960	418	237	67.5	47.0	11.6	74.6	7.73
Desviación	224	111	106	74.5	59.0	12.5	7.0	2.83	31.6	1.70
Máximo	2600	966	1110	563	351	85.5	60.6	15.9	140	9.93
Mínimo	1890	607	837	280	155	43.6	37.1	8.50	30.3	5.08
C.Variación	0.10	0.13	0.11	0.18	0.24	0.18	0.15	0.24	0.39	0.21
C.Sesgo	0.17	-1.45	0.14	-0.18	0.34	-0.64	0.35	0.47	0.32	-0.63

Extrapolación de Caudales Máximos Instantáneos en m³s⁻¹

PERIODO DE RETORNO AÑOS	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (%)	ANG. BALA	ANG. INICUA	NUBE	ANG. QUER.	STA. RITA	VILLA BARR.	PTE. VILLA	SIR.	CAJ.
1.0101	0.01	8928	929	4223	994	617	96	100	34	10.5
1.0526	0.05	9421	2626	4716	1112	847	157	143	38	93.6
1.11	0.1	9867	3484	5048	1205	1031	197	172	41	216
1.25	0.2	10594	4481	5530	1358	1340	250	209	45	379
2	0.5	12704	6261	6774	1841	2407	373	296	60	756
5	0.8	15972	7880	8636	2797	4857	538	414	89	1264
10	0.9	18198	8664	9969	3655	7357	648	492	115	1600
25	0.96	21008	9454	11774	5058	11914	786	590	157	2025
50	0.98	23057	9940	13206	6379	14754	889	664	196	2340
100	0.99	25059	10360	14718	7981	17058	991	736	243	2653
200	0.995	27085	10732	16320	8430	19354	1092	808	300	2965
1000	0.999	31603	11483	20480	10518	24672	1327	975	480	3687
10000	0.9999	37890	12352	27668	13501	32273	1663	1214	919	4718

BIBLIOGRAFIA

CARRASCO NATTES L.M., Aplicaciones y Manual de Manejo - Programa M.C.M. ver 1.0 (Mecanismos - Computacionales - Multipropósito ver 1.0), In Press.

CARRASCO NATTES L.M. (1990). Estudio del régimen del escurrimiento superficial en la cuenca andina del Río Beni. Tesis UMSA. Publ. PHICAB, La Paz.

HERAS RAFAEL (1976). Hidrología y Recursos Hidráulicos. Tomos I y II. (Madrid).

BOURGES J., GUYOT J.L., CARRASCO L.M., BARRAGAN M.C., CORTEZ J., (1990), Evolution spatio temporelle des débits et des matières particulaires sur un bassin des Andes Bolivienne: le Río Beni, 352-356, In Hydrology in Mountainous Regions, H. Lang & Musy (eds), IAHS Publ. 193.

BOURGES J., CARRASCO L.M., HYDROM, (1990), Manual del Usuario, ORSTOM. Eds, Montpellier.

ALDEGHERI M., ORSTOM.(1979), Manuel d'hydrométrie. Mesure des débits a partir des vitesses.Tomo IV., ORSTOM Eds, Paris

GUÍA DE PRÁCTICAS HIDOLÓGICAS VOLÚMEN I. No.168 (1984), Adquisición y proceso de datos. (OMM).

PROYECTO HIDROMETEREOLOGICO CENTRO AMERICANO (1969), Publicación No.70, Manual de Instrucciones - Estudios Hidrológicos (San José, Costa Rica).

SOUZA, PINTO, Hidrología Aplicada.

ESTUDIO SEDIMENTOLOGICO DE LA CUENCA ANDINA DEL RIO BENI

Germán PALENQUE E.⁽¹⁾, M. Cristina BARRAGAN G.⁽²⁾

(1) IHH-UMSA, CP 699, La Paz, Bolivia

(2) CP 6437, La Paz, Bolivia

CARACTERISTICAS GENERALES

La Cuenca Andina del río Beni se halla ubicada entre los paralelos 14 02'30" - 17 38'57" de latitud sud y 66 04'27"- 69 15'08" de longitud oeste, abarca una extensión aproximada de 67160 Km² (ref.1). Se encuentra en los departamentos de La Paz, Cochabamba y Beni.

Dada su gran extensión abarca diversas unidades fisiográficas entre las que se destacan la Cordillera Real formada a su vez por un complejo de cadenas montañosas en la que existen depresiones tectónicas rellenas por sedimentos cretácicos y cuaternarios cuyos principales agentes de modelación son la meteorización por heladas y los movimientos en masa. En los valles profundos que se sitúan entre las cumbres cordilleranas y los contrafuertes del subandino se desarrollan los Yungas; en estas regiones la erosión es menor debido al desarrollo de una densa vegetación que tiende a preservar el relieve existente.

Entre la Cordillera Real y los llanos orientales se desarrolla una serranía denominada Subandino Norte formada por una serie de cadenas paralelas que se elevan entre las cotas 500 y 2000 msnm, en ella se encuentran sedimentos cuaternarios en forma de depósitos aluviales, fluvio-lacustres y coluviales (gravas, arenas lutitas limonitas).(ref.2 y 3).

El sector occidental de la cuenca que se encuentra en la región de montañas muy altas y escarpadas (sobre los 3000 msnm) esta formado por suelos que varían desde poco profundos, excesivamente drenados hasta suelos melanizados de estructura moderada. Estas zonas se hallan cubiertas por pastos y arbustos naturales desarrollados en condiciones ambientales de régimen temporal (22%) y zonas más abruptas con afloramientos rocosos (15%). En la faja subandina los suelos varían de acuerdo a la región, pero en general abundan los suelos de estructura mediana sobre subsuelo gravoso rojizo, presentando valles húmedos y secos. Esta zona se halla cubierta por bosques siempre verdes desarrollados en serranías y colinas generalmente erosionadas con pendientes abruptas a moderadas (3000 a 500 msnm) en un porcentaje aproximado de 50% del área total.(ref.4).

ASPECTOS EROSIVOS DE LA CUENCA

Son varios los parámetros que intervienen en la producción de sedimentos de una cuenca, entre estos se tienen : El régimen de precipitación, escurrimiento, la topografía, las características del suelo, el uso del suelo y su cobertura vegetal.

La Cuenca Andina del río Beni se ha subdividido en cinco subcuencas en función a la ubicación de los puntos de control existentes, las cuales se describen a continuación :

Subcuenca La Paz

La subcuenca de La Paz abarca las provincias: Murillo, Loayza e Inquisivi del departamento de La Paz. Orográficamente se halla limitada por las cordilleras de La Paz y Tres Cruces.

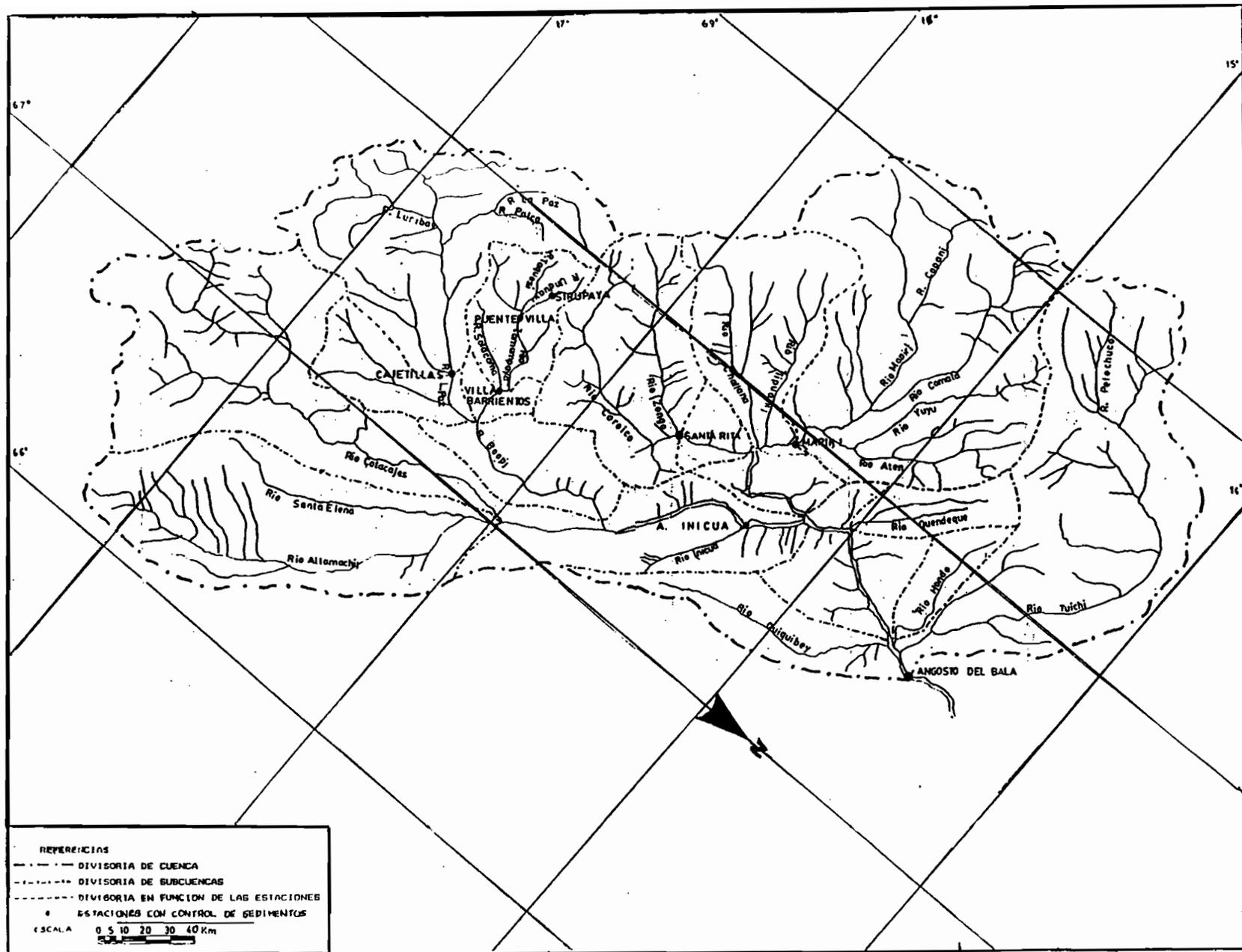


Fig. 1 Cuenca Andina del Río Beni

Las unidades fisiográficas que la componen son: La Cordillera Real y el Subandino norte. Hidrográficamente el río más importante es el río La Paz que nace en las alturas de Chacaltaya con el nombre de río Choqueyapu, recibe a su paso numerosos afluentes entre los que se destacan: el Catambita, Miguillas, Chunga Mayu, Cañamina, Caracato, Luribay, Sapahaqui, Palca y Kaluyo.

Se encuentra en una zona netamente montañosa, su cobertura vegetal es deficiente, un porcentaje considerable del área se encuentra cubierta por arbustos desarrollados en condiciones ambientales secas donde predominan las tierras eriales (54%) provocando que el terreno no sea apto para la agricultura; en las zonas de altura intermedia se han desarrollado pastos y bosques en un porcentaje aproximado del 25%. La falta de una buena cobertura vegetal, ocasiona un elevado índice de erosión potencial en la cuenca (4119 t km⁻² a⁻¹).

Subcuenca Tamampaya

La subcuenca de Tamampaya abarca parte de la Provincia Murillo del Departamento de La Paz. Los rasgos orográficos más importantes están definidos por la Cordillera de La Paz; fisiográficamente ocupa las zonas de la Cordillera Real y el Subandino Norte. Entre los ríos más importantes se encuentran: el río Solacama, Unduavi, Taquesi y el río Tamampaya que recibe este nombre al unirse los dos anteriores. En las zonas altas predominan los afloramientos rocosos (23%). Las zonas de altura intermedia se hallan cubiertas por bosques desarrollados en colinas y serranías generalmente erosionadas con pendientes abruptas a moderadas (38%), pastos y arbustos (14%).

Subcuenca Alto Beni

Esta subcuenca se desarrolla sobre las siguientes Provincias: Murillo, Loayza, Sud Yungas y Larecaja del Departamento de La Paz; Ayopaya, Tapacarí y Chapare del departamento de Cochabamba. Abarca dentro de su área a las subcuencas Boopi, Cotacajes y Santa Elena Altamachi.

La red hidrográfica principal está conformada por los ríos Tamampaya, La Paz, Boopi, Cotacajes, Santa Elena, Altamachi e Inicua. Se encuentra desarrollada dentro de la Cordillera Real, el Subandino Norte, Yungas y Valles. Se halla limitada al noroeste por la Cordillera de La Paz, al sudoeste por la cordillera de Tres cruces, al sud por la Cordillera de Cochabamba y al este por la Cordillera de Mosetenes.

La cobertura vegetal predominante está formada por bosques siempre verdes desarrollados en tierras de altura intermedia, aproximadamente un 40% del área total, pastos y arbustos desarrollados en zonas altas de ambiente temporal seco, con afloramientos rocosos (21%), añadiéndose un pequeño porcentaje dedicado a la agricultura (3%).

Subcuenca Coroico - Zongo

La subcuenca Coroico-Zongo abarca parte de las provincias Nor-Yungas y Larecaja del departamento de La Paz. Se halla limitada al oeste por la Cordillera de La Paz. Fisiográficamente ocupa la Cordillera Real, el frente Subandino y los Yungas. La red hidrográfica está formada por: el río Coroico, Zongo, Taypiplaya, Quita Calzón y Choro. Las zonas altas se encuentran cubiertas por pastos y arbustos propios de la zona, dependiendo principalmente de las condiciones de humedad ambiental; en las zonas de altura intermedia predominan los bosques siempre verdes en un porcentaje aproximado del 68%.

Subcuenca Mapiri

El área correspondiente a esta subcuenca se ubica sobre las Provincias Larecaja, Muñecas, Bautista Saavedra y parte de la Provincia Franz Tamayo; todas ellas pertenecientes al departamento de La Paz.

Se halla limitada al noroeste por la Cordillera de Apolobamba, al oeste por la

cordillera de Muñecas, al sud y sudeste por la Cordillera de La Paz. Se halla drenada por varios ríos entre los que se destacan: el Challana, Tipuani, Consata, Mapiri y Aten.

Presenta un elevado porcentaje de bosques siempre verdes (45%), desarrollados en zonas de altura intermedia con pendientes abruptas a moderadas, generalmente erosionadas, al igual que pastos y arbustos tanto en la parte alta como en la parte intermedia (31%).

Las características morfométricas de las subcuencas que conforman la Cuenca Andina del río Beni se muestran en el Cuadro No. 1.

CUADRO No. 1 : CARACTERISTICAS MORFOMETRICAS DE LAS SUBCUENCAS

SUBCUENCA	AREA km ²	PERIMETRO km	K	L	l	DH	Ip
LA PAZ	6500	420	1.46	172.3	37.7	60.5	15.6
TAMAMPAYA	2124	195	1.18	64.6	32.9	49.0	21.0
ALTO BENI	29640	845	1.37	333.7	88.8	55.9	12.2
COROICO-ZONGO	4700	295	1.20	100.9	46.6	33.7	20.0
MAPIRI	10560	541	1.47	223.2	47.3	47.3	16.8

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Sedimentos en suspensión

Son ocho las Estaciones Hidrométricas que cuentan con registros de material en suspensión, los que han sido registrados en diferentes periodos, y se hallan distribuidas en toda la cuenca definiendo un área determinada de aporte de sedimentos. En el cuadro No. 2 se encuentran las estaciones que tienen registros de la concentración de sedimentos en suspensión.

CUADRO No. 2 : ESTACIONES CON REGISTROS DE SEDIMENTOS

SUB-CUENCA	ESTACION	S/RIO	UBICACION		ALTURA msnm	DATO	PERIODO	CONCENTRACION [gr/l]
			LAT SUD	LONG OEST				
TAMAMPAYA	SIRUPAYA	UNDUAVI	16 25'	67 46'	1640	95	1980/ 83	0.057 - 13.48
TAMAMPAYA	PUENTE VILLA	TAMAMPA	16 23'	67 37'	1185	314	1975 - 8	0.011 - 9.47
TAMAMPAYA	VILLA BARRIENTOS	TAMAMPA	16 18'	67 27'	1050	346	1975 - 8	0.004 - 42.13
LA PAZ	CAJETILLAS	LA PAZ	15 26'	67 17'	762	316	1973 - 7	0.100 - 470.53
ALTO BENI	ANGOSTO INICUA	ALTO BE	15 18'	67 33'	420	152	1975 - 7	0.0014 - 34.82
COROICO - ZONGO	S.R. BUENOS AIRES	COROICO	15 43'	67 43'	435	49	1976 - 7	0.0065 - 7.52
MAPIRI	ANGOSTO QUERCANO	MAPIRI	15 23'	67 58'	600	342	1975 - 7	0.011 - 23.43
ANDINA DEL RIO BENI	ANGOSTO DEL BALA	BENI	14 33'	67 33'	268	415	1969/72 1982	0.0044 - 18.84

Se ha establecido una relación entre el caudal líquido y su correspondiente caudal sólido en suspensión (ver cuadro No. 3). Se observa que la función potencial es la que tiene el mejor ajuste para todos los casos estudiados (en las ocho estaciones).

Para estimar el volumen anual de sedimentos transportados en suspensión, se ha aplicado el método de la curva de duración de caudales descrito en las refs.[5] y [7].

Se han elegido tres períodos diferentes para cada estación donde cada uno de ellos representa a un año hidrológico normal, seco y húmedo.

Obtenidas las curvas de duración de caudales se han promediado los resultados para cada una de las estaciones como se muestran en los Cuadros 4 y 5. El transporte de sedimentos en suspensión total a la salida del Angosto de Bala es del orden de $208 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$.

CUADRO No. 3 : CORRELACION $X = Q \text{ [m}^3/\text{s]}$

ESTACION	No. PUNTO	CORRELACION LINEA $Y = A + B.X$			CORRELACION EXPONENCIAL $Y = A . B^X$			CORRELACION POTENCIAL $Y = A . X^B$		
		A	B	r	A	B	r	A	B	r
		SIRUPAYA	95	-27.05	4.42	0.68	2.48	1.12	0.71	0.0025
PUENTE VILLA	314	-78.96	2.69	0.64	0.06	1.54	0.81	0.058	1.53	0.81
VILLA BARRIENTOS	346	-229	5.45	0.63	10.24	1.01	0.74	0.027	1.83	0.84
CAJETILLAS	316	-283.6	2.3	0.68	5.67	1.01	0.78	0.0004	2.021	0.884
ANGOSTO INICUA	152	3408.3	79	0.62	29.5	1.02	0.72	0.004	2.62	0.81
S.R. BUENOS AIRE	49	1348.9	6.84	0.75	67.47	1	0.79	0.00057	2.27	0.88
ANGOSTO QUERCANO	342	3090.7	8.82	0.33	79.92	1	0.74	6.1E-05	2.47	0.87
ANGOSTO DEL BALA	415	-8987	7.7	0.82	187	1	0.81	4.6E-06	2.62	0.92

CUADRO No. 4 : TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION

ESTACION	PERIODO			PROMEDIO	
	t/d	t/a			
SIRUPAYA	79/80	81/82	82/83	1269	463185
	1413	795	1599		
PUENTE VILLA	75/76	77/78	82/83	2008	732920
	77275	2402	1570		
VILLA BARRIENTOS	75/76	77/7	81/82	6257	2283805
	5843	8427	4501		
CAJETILLAS	74/75	80/81	81/82	73344	26770560
	77275	55554	87204		
ANGOSOTO INICUA	76/77	80/81	81/82	182078	66458470
	175191	160406	210635		
S.R. BUENOS AIRES	76/77	81/82	82/83	13892	5070580
	11450	22508	7717		
ANGOSTO QUERCANO	77/78	79/80	81/82	99805	36428825
	69048	138596	91772		
ANGOSTO DEL BALA	76/77	77/78	81/82	571370	208550050
	368462	587794	757853		

CUADRO No. 5 : APORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION
EN LA CUENCA ANDINA DEL RIO BEN

SUB-CUENCA	ESTACION	CAUDAL MEDIO m ³ /s	AREA km ²	\bar{w}	EROSION t/d	EROSION t/a	TASA DE EROSION t/km ² /a	EROSION S/TOTAL
TAMAMPAYA	SIRUPAYA	12.6	245.3	0.4	1269	463185	1888	0.2
TAMAMPAYA	PUNTE VLLA	47.2	341	0.5	2008	732920	2149	0.4
TAMAMPAYA	VLLA BARRENTOS	64.6	2124	3.0	6257	2283805	1075	1.1
LA PAZ	CAJETILLAS	72.4	6500	9.7	73344	26770560	4119	12.8
ALTO BEN	ANGOSTO INDIJA	843.8	29640	44.1	182078	66458470	2242	31.9
COROICO - ZONGO	S.R. BUENOS AIRES	264.3	4700	7.0	13892	5070580	1079	2.4
MAPR	ANGOSTO QUERCANO	574.3	10560	15.7	99805	36428825	3450	17.5
SUPLEM. ALTO BEN (*)			21250	31.6	102477	37406660	1750	17.9
SUPLEM. BEN (*)			22260	33.1	289487	105662755	4747	50.7
ANDINA DEL RIO BEN	ANGOSTO DEL BALA	2272	67160	100.0	571370	208550050	3105	

(*) valores estimados

SUPLEM. ALTO BEN (*) = subc. ALTO BEN - LA PAZ - TAMAMPAYA
 SUPLEM. BEN (*) = CUENCA ANDINA - ALTO BEN - MAPR - COROICO

ARRASTRE DE FONDO

Para la cuantificación de la otra componente del caudal sólido, la carga de fondo, se disponen solamente de datos registrados en la Estación de Sirupaya.(ref.[6]).

CUADR No. 6: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTRE

Periodo	t/d	t/a
79/80	250.13	91297
81/82	128.02	46757
82/83	279.74	102105
Promedio	219.30	80053

CUADRO No. 7 : CAUDAL SOLIDO TOTAL

Caudal solido	t/a	%
En suspension	463185	85.26
Arrastre de fondo	80053	14.74
Total	543238	100

La Empresa Nacional de Electricidad (E.N.D.E.) llevó a cabo una campaña de medición del caudal sólido en el río Unduavi entre los años 79/80, 81/82 y 82/83. De estas campañas se lograron obtener 63 datos del caudal sólido por arrastre, con sus respectivas curvas de distribución granulométrica.

Con una metodología similar a la empleada para cuantificar el transporte de sedimentos en suspensión, se determinó el transporte de sedimentos por arrastre, obteniéndose el valor de 80 053 ton/año que representa el 14.74% del caudal sólido total que transporta el río Unduavi hasta el punto de control, ver cuadros (6 y 7).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio, permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Se ha determinado la existencia de diferentes factores que influyen de una manera significativa en la erosión de una cuenca, y por lo tanto en la cantidad del material que esta aporta a las corrientes de agua. Entre estos, se pueden mencionar los siguientes:
 - a. La carencia de una cobertura vegetal adecuada que proteja el suelo y disminuya los efectos de los procesos erosivos, en la parte alta de todas las subcuencas, donde se presentan fuertes pendientes características de las zonas montañosas. Este aspecto es el factor preponderante para que se registre la mayor tasa de erosión de toda la Cuenca Andina del río Beni justamente en la zona de la Subcuenca La Paz; que se caracteriza por presentar un alto porcentaje de tierras eriales.
 - b. El uso que se le da al suelo influye en gran manera para acelerar el proceso erosivo.

Según el Cuadro No. 5 la subcuenca La Paz, presenta la mayor tasa de erosión o degradación específica ($4119 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), debido a que se desarrolla en una zona netamente montañosa (74% de su área), encontrándose en una fase de desequilibrio, en la que se produce cambios bruscos de pendiente, y los procesos de erosión y transporte de material suelto son considerables.

La subcuenca Mapiri también presenta una elevada tasa de erosión ($3450 \text{ t km}^2 \text{ a}^{-1}$). Analizando los factores topográficos y de cobertura vegetal, se podría concluir que ninguno

de ellos son causantes de este hecho, pero existe un factor que por falta de información no se ha podido cuantificar, es el uso que se le da al suelo. Desde hace unos años atrás se realiza la explotación aurífera en la zona del río Mapiri, produciendo grandes movimientos de tierra que provocan la destrucción de la cobertura vegetal, aumento del cauce del río, mayor erosión y transporte de material suelto, ocasionando un desequilibrio ecológico.

Las subcuencas que presentan las menores tasas de erosión son la de Coroico-Zongo y Tamampaya, por encontrarse cubiertas por bosques siempre verdes desarrollados en zonas altas e intermedias.

Los datos de caudales y concentración de sedimentos en suspensión provienen de ocho estaciones distribuidas en toda la cuenca y se caracterizan por presentar una gran diversidad de períodos y número de observaciones existiendo una gran heterogeneidad en los datos mismos, no existe continuidad en el registro de muestras; lo que produce alteraciones en los resultados.

El transporte de sedimentos en suspensión registrado a la salida de la cuenca en "El Angosto del Bala" es del orden de 208 550 050 t a⁻¹ con una tasa media de erosión de 3105 t km⁻² a⁻¹. Las estaciones que registran las mas altas tasas de erosión son: Cajetillas ubicada sobre el río La Paz, que controla todo el aporte de sedimentos provenientes de la cuenca que lleva el mismo nombre (4119 t Km⁻² a⁻¹) y Angosto Quercano ubicada sobre el río Mapiri (3450 t km⁻² a⁻¹); la mínima se registra en las estaciones de Villa Barrientos ubicada sobre el río Tamampaya (1075 t km⁻² a⁻¹) y Santa Rita de Buenos Aires sobre el río Coroico (1079 t km⁻² a⁻¹).

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos en todas las estaciones y en especial en "El Angosto del Bala", se observa en general que los valores son bastante elevados comparados con los resultados obtenidos en otros ríos de nuestro país.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I.G.M., (1978), Mapa político de Bolivia, ESc. 1:1000000
- [2] MONTES DE OCA, (1982), Geografía y recursos naturales de Bolivia, Banco Central de Bolivia
- [3] GEOBOL, (1978), Memoria explicativa del mapa geológico de Bolivia escala 1:1000000
- [4] I.G.M., (1978), Memoria explicativa del mapa de cobertura y uso actual del suelo Esc. 1:1000000
- [5] VANOLI, (1975), Sedimentation engineering, Ed. ASCE.
- [6] E.N.D.E., (1980), Proyecto hidroeléctrico SAKHAHUAYA. Hidrología y sedimentología
- [7] CURSO CORTO DE SEDIMENTACION FLUVIAL EN TERRENOS VOLCANICOS, (1988), Guatemala

CLIMATOLOGIA DE LA CUENCA DEL RIO GRANDE

Carlos HERBAS C.

IHH-UMSA, CP 699, La Paz, Bolivia

DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

Situación geográfica

La cuenca del Río Grande tiene un área de 114 800 km² y está comprendida entre las coordenadas geográficas 15° 55' a 20° 15' de latitud Sur y 62° 45' a 67° 00' de longitud Oeste, abarcando parte de los departamentos de Cochabamba, Sucre y Santa Cruz (ver fig N° 1).

El Río Grande nace cerca de Cochabamba en la vertiente oriental de los Andes, donde las altitudes oscilan entre 3500 a 4500 m.s.n.m. Desciende luego muy rápidamente a través de terrenos muy escarpados. En Abapo emerge desde valles montañosos y luego atraviesa una planicie muy uniforme a una altitud aproximada de 400 metros y fluye hacia el Norte para unirse a los afluentes del río Amazonas.

La cuenca tiene dos zonas bien diferenciadas, una montañosa y la otra plana; ambas prácticamente de igual superficie. En la parte superior, los suelos son derivados de areniscas y lutitas, las tasas de erosión son altas debido a que las colinas y los canales son escarpados. La vegetación es escasa y principalmente de monte bajo, se observa además la presencia de matorrales espinosos con pequeñas áreas de pajonal y con poca tierra bajo cultivo. La parte de aguas abajo de la cuenca es muy diferente a la que se ha descrito: las pendientes de las laderas y de los canales son muy bajas, la precipitación es alta, la vegetación elevada y la presencia de pantanos indican que el nivel freático en esta región es alto.

Hidrometeorología

La figura N° 2 muestra la posición media de la Zona de Convergencia Intertropical en verano e invierno para el hemisferio sur. En verano (Enero) la zona de convergencia intertropical se mueve sobre el continente hacia el Sur hasta como los 25° de latitud. El aire caliente, húmedo e inestable, se mueve hacia el Sur sobre la cuenca del Amazonas y a medida que converge y se eleva da origen a fuertes precipitaciones. Esto causa la alta precipitación media anual sobre la parte baja de la cuenca. Contrariamente a lo que podría esperarse, las zonas altas reciben menos precipitación; ésto probablemente resulta en parte del hecho de que las masas tropicales de aire pierden la mayoría de la humedad precipitable en el momento que alcanzan altitudes de 2.000 a 2.500 mts. Adicionalmente se debe mencionar la posibilidad de que la baja precipitación sea también causada por el estable aire "tropical marítimo" que periódicamente sobrepasa las tierras altas de los Andes en Bolivia y que vienen desde la costa del Pacífico.

En invierno (Julio) la zona intertropical de convergencia se desplaza al Norte del Ecuador y ya no existe fuerte convergencia sobre la cuenca del río Grande, por ende la precipitación es mucho menor.

LA RED DE ESTACIONES METEOROLOGICAS

El record de datos históricos utilizado para el estudio es de 15 años, período de 1968-

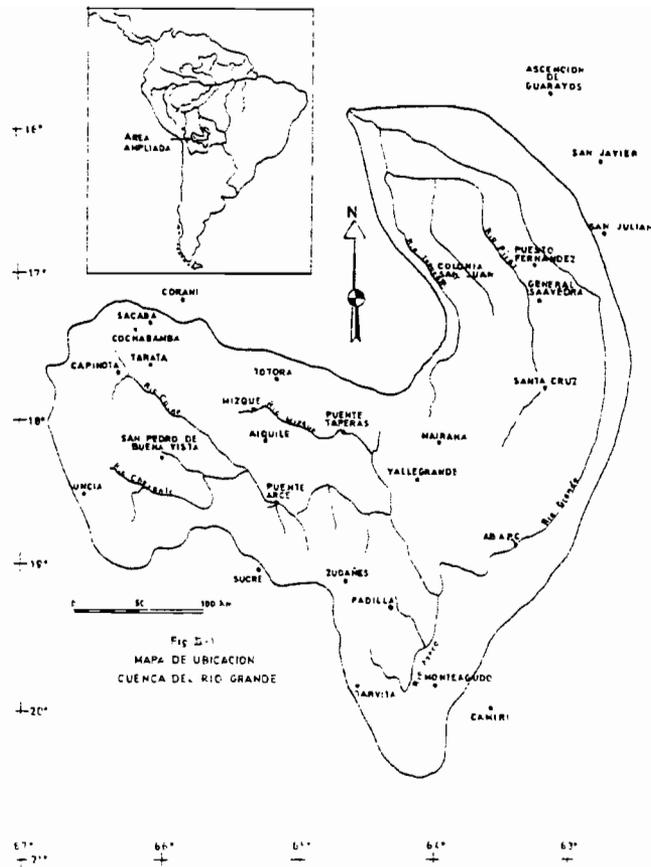


Fig. 1

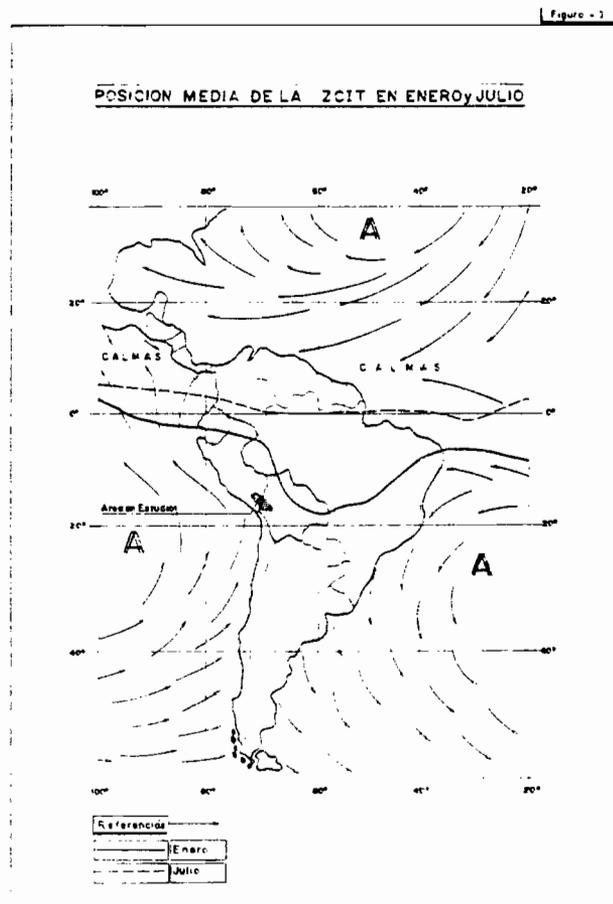
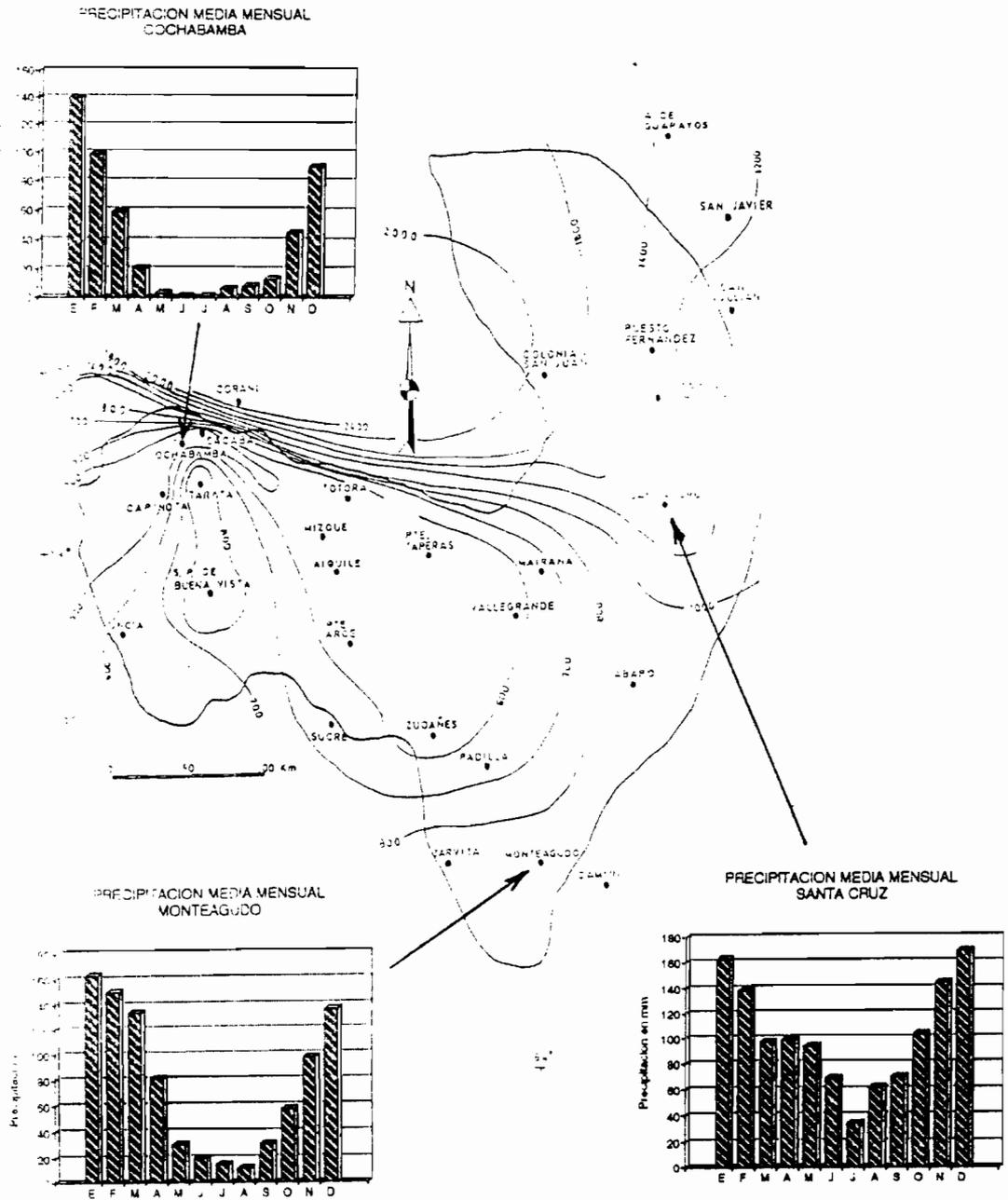


Fig. 2

PRECIPITACION MEDIA ANUAL (valores en mm)

Figura N° 3



1982; el mismo que fue definido debido a la disponibilidad de información simultánea en toda la cuenca. La figura N° 1 proporciona la ubicación de las estaciones meteorológicas.

Si bien los períodos medios recomendables para tipificar los fenómenos atmosféricos son del orden de 30 años, se considera que, de acuerdo a la situación de los datos disponibles en la mayor parte de las estaciones, sólo es realmente factible realizar el estudio para un período más corto, el ya indicado.

ESTUDIO DE PRECIPITACIONES

La figura N° 3 muestra la precipitación media anual para toda la cuenca. En ella se observa que en la parte de los llanos los registros varían entre 1000 y 2000 mm y en la zona montañosa, se registran valores entre 450 a 800 mm.

La figura también muestra la variación mes a mes de la precipitación en las estaciones más representativas dentro la cuenca. Así se tiene que para la parte alta de la cuenca (tomando la estación Cochabamba como representativa), la estación más húmeda se extiende de Diciembre a Marzo, con cerca del 80% de la precipitación anual. La sequedad es casi absoluta de Mayo a Septiembre. En la parte media de la cuenca (tomando la estación de Monteagudo como representativa), la estación húmeda se extiende de Noviembre a Marzo y abarca un 70% del total. La estación seca es de Mayo a Septiembre. En la parte baja, tomando a Santa Cruz como estación representativa, se puede observar que no existe estación seca aunque en el invierno la humedad es menor.

ANALISIS DE TEMPERATURA

La carta de Isotermas anuales (fig N° 5) muestra que las temperaturas más elevadas se encuentran en la parte baja de la cuenca con registros mayores a los 22°C. La parte media registra de 16 a 20°C y en la parte alta, la temperatura varía entre 10 y 16°C.

En lo que respecta a las temperaturas máximas y mínimas promedio anual (fig N° 6), se tiene que los máximos llegan a 30°C en la parte baja y disminuyendo gradualmente hasta llegar a 18°C en la parte alta. Las mínimas promedio son de 2 a 5°C para la parte alta y según disminuye la altitud, los valores alcanzan a los 18°C en la parte baja de la cuenca.

VIENTOS Y HUMEDAD RELATIVA

La fig. N° 7 muestra la rosa de los vientos anual para cada sitio de observación mientras que la fig. N° 8 indica la distribución de la humedad relativa en la cuenca. Así tenemos que, en la parte baja de la cuenca la humedad varía entre 70 y 80 %, en la parte media los valores oscilan entre 55 y 65% y finalmente la parte alta registra valores inferiores a 50%.

EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION

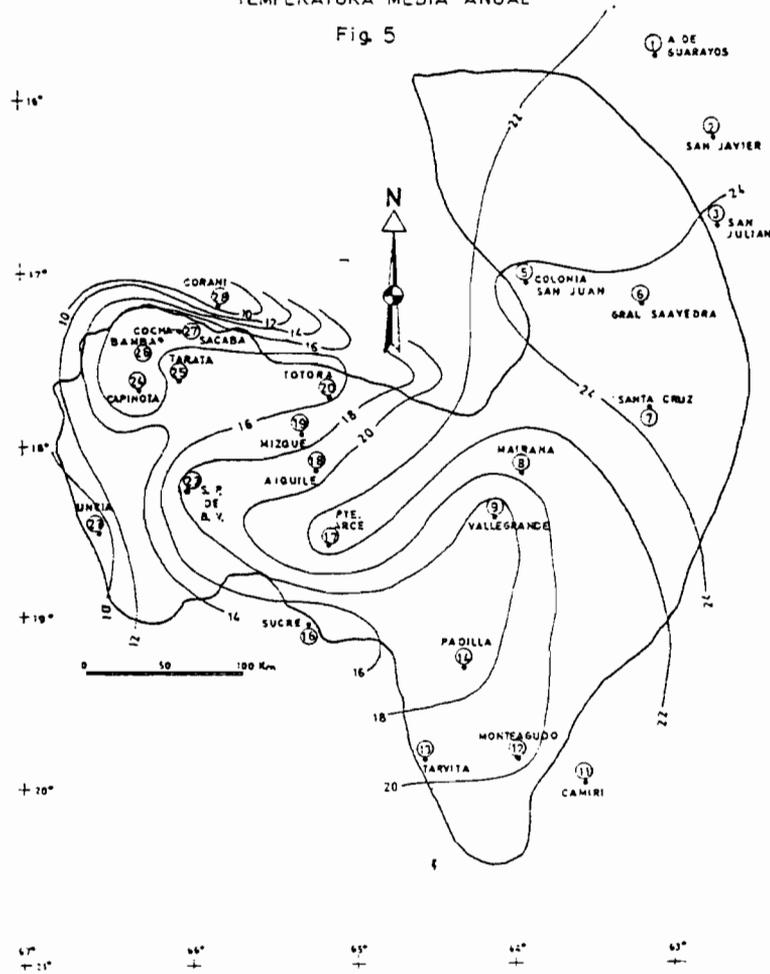
Existen numerosos métodos para estimarla, algunos muy sofisticados para los antecedentes meteorológicos que poseen mayor parte de las estaciones en la cuenca. Es por esta razón que para el cálculo se utilizó el método de Thornthwaite, debido principalmente a que exige sólo una variable meteorológica: la temperatura.

El método de Thornthwaite para la estimación de la ETP, aunque es de fácil aplicación, puede no dar resultados acordes con la realidad en latitudes tropicales, ya que análogas temperaturas medias pueden corresponder a acentuadas diferencias de radiación solar entrante.

En vista de lo dicho anteriormente, sobre el uso del método de Thornthwaite en latitudes tropicales y en especial en las regiones montañosas, hemos representado en la tabla N° 2 la

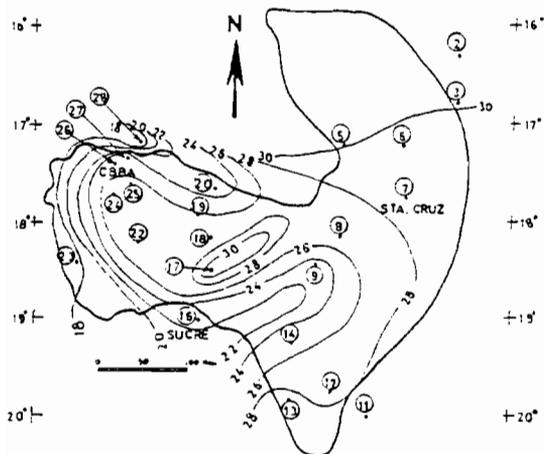
TEMPERATURA MEDIA ANUAL

Fig. 5



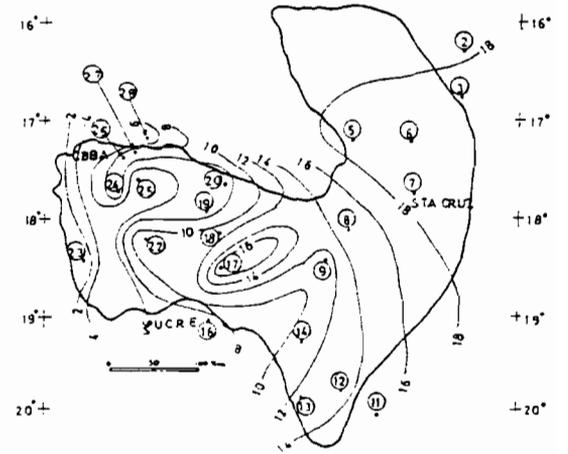
Temperatura Maxima Promedio Anual

Fig. 6

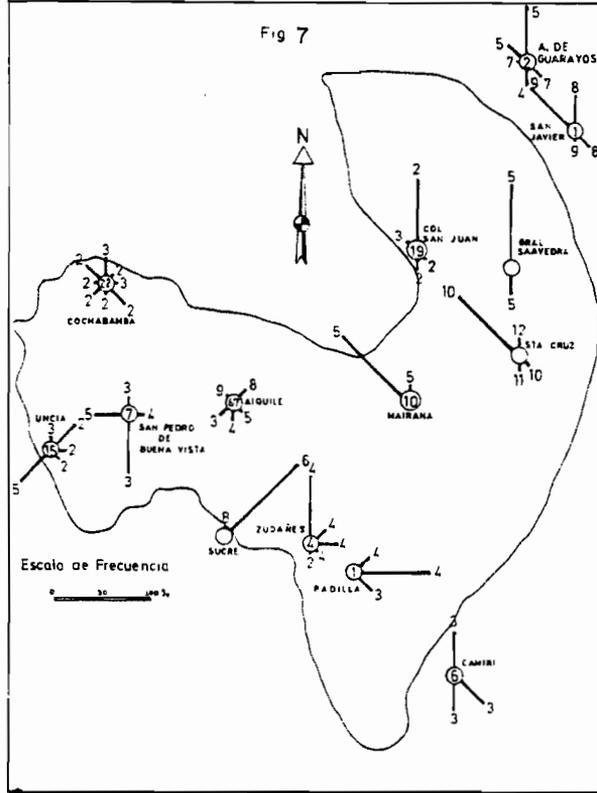


Temperatura Minima Promedio Anual

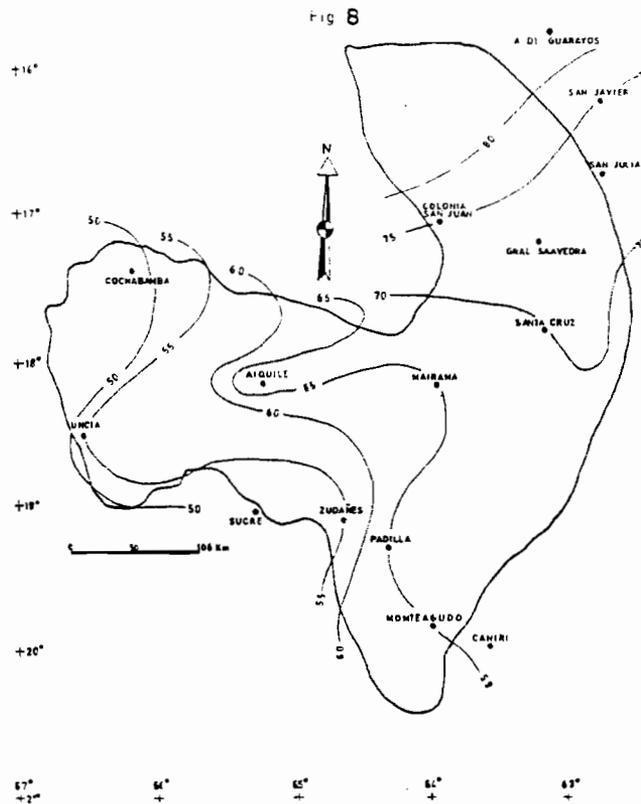
Fig. 6



DIRECCION, FRECUENCIA Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO ANUAL



HUMEDAD RELATIVA MEDIA ANUAL (%)



serie mensual de 6 estaciones distribuidas en toda el área, e indicamos para cada estación, la relación entre la ETP calculada por la fórmula de Penman (ETP_p) y la obtenida por la de Thornthwaite (ETP_{TH}). Dicha tabla muestra una relación curvilínea en la que la relación ETP_p/ETP_{TH} va desde 0.68 al nivel de 320 m de altitud (Colonia San Juan) hasta 1.39 aproximadamente a 2900 m de altitud (Sucre), pasando por el valor de 1, a 2100 m de altitud (Padilla).

Tabla N° 2: Comparacion entre ETP(Penman) y ETP(Thornthwaite) para diferentes altitudes

ESTACION	COORDENADAS		ALTITUD m.s.n.m.	PENMAN	THORNTHWAITE	P/Th
	Lat. S	Long. W				
COL. SAN JUAN	17 15'	63 50'	320	882	1288	0.68
GRAL. SAAVEDRA	17 14'	63 10'	350	1088	1301	0.84
SANTA CRUZ	17 47'	63 10'	416	1282	1380	0.93
PADILLA	19 18'	64 18'	2102	819	801	1.02
COCHABAMBA	17 26'	66 10'	2580	895	830	1.08
SUCRE	19 03'	65 13'	2903	1009	726	1.39

CLASIFICACION CLIMATICA

La clasificación climática en la cuenca, se la realizó según la metodología propuesta por el Dr. W. Thornthwaite. Consideramos este método muy útil e interesante desde el punto de vista de la favorabilidad del clima para la vida vegetal y puede servir de base, o al menos de orientación, en la delimitación de zonas aptas para la agricultura, en lo que a limitaciones climáticas se refiere. Son evidentes las restricciones impuestas por el corto número de estaciones utilizadas; y en la representación cartográfica de los distintos tipos climáticos, se ha recurrido a interpolaciones, por lo que los límites o bordes de las zonas climáticas pueden, en algunos casos, apartarse de la realidad.

Para la clasificación, se ha tenido en cuenta los valores medios de las variables climáticas estimadas y completadas para el período 1968-1982. La figura N° 9 presenta la distribución de los diferentes tipos climáticos que se presentan en la cuenca.

BIBLIOGRAFIA

BECHTEL OVERSEAS INC., Proyecto Río Grande-Rositas, Prudencio Claros y Asociados, Agrar Und Hydrotechnik, 1975, Vol. 10-Anexo (B-3A), Hidrología San Francisco-La Paz-Essen.

CUSTODIO E., LLAMAS R., Hidrología Subterránea, Tomo I, Ed. Omega S.A., Madrid, 1976.

CHEVARRÍA G.; PEREIRA M., Hidrología de la Cuenca del Río Grande, Instituto Italo Latino Americano, Nápoles-Italia, 1974.

GARCIA A., Balance Hídrico del Río Mamoré, Tesis UMSA, La Paz-Bolivia, 1975.

GARCIA AGREDA R. Y VIPARELLI R., Perfil Esquemático del Clima y de la Hidrología en Bolivia, Instituto Italo Latino Americano e Instituto de Construcciones Hidráulicas de la Universidad de Nápoles, Roma-Italia.

HUFTY A., Introduction á la Climatologie, Presses Universitaires de France, Paris, 1976.

LINSLEY R.K. KOHLER M.A. PAULHUS J.L.H., Hidrología para Ingenieros, Ed. McGraw Hill Latinoamericana S.A., Bogotá-Colombia, 1975.

LONGLEY R.W, Tratado Ilustrado de Meteorología, Ed. Santander, 1968.

LUCERO O., Tratamiento de la Información de Redes Pluviométricas para Fines Hidrológicos, INCYTH, Bs.

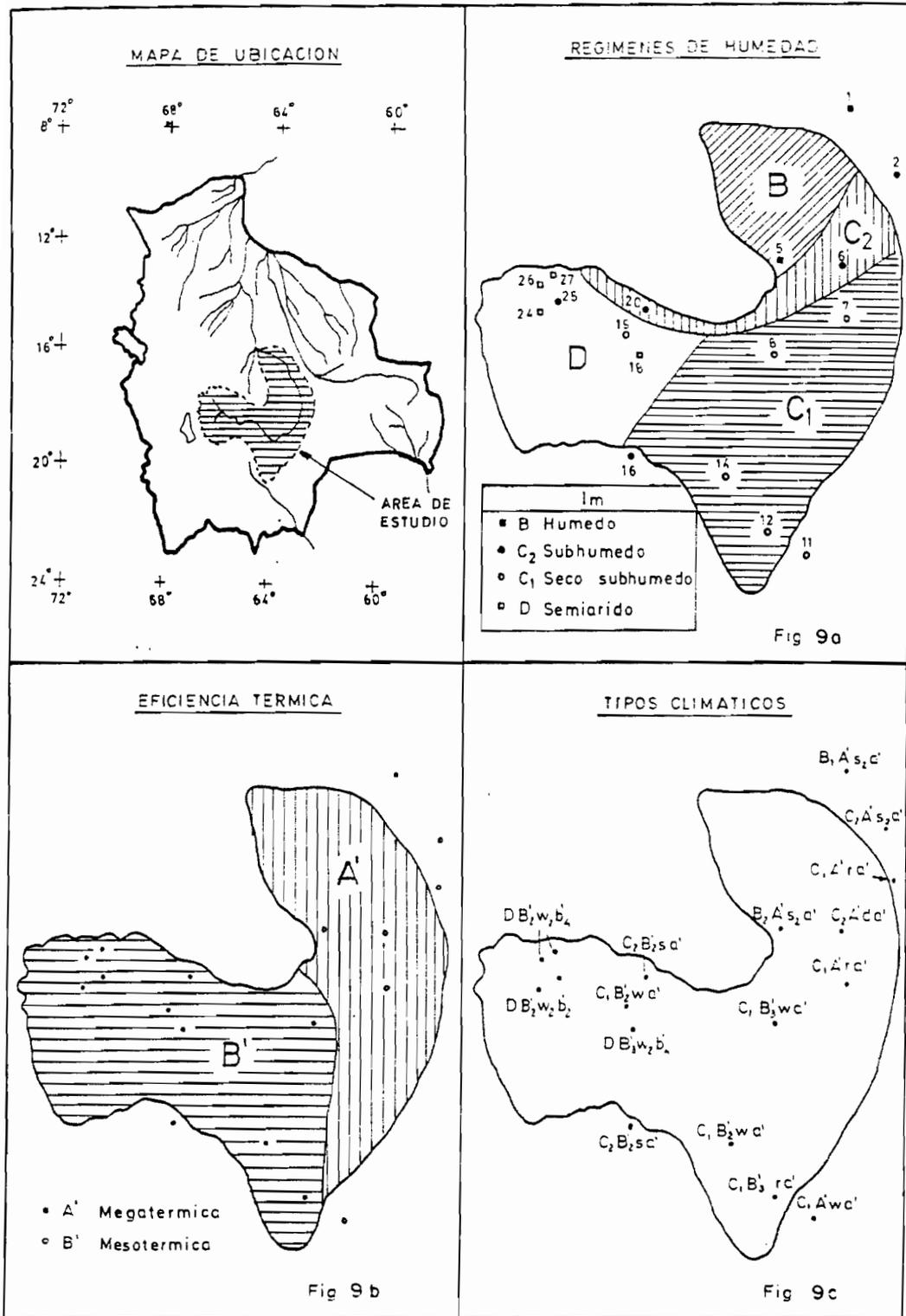


FIGURA 9

As.-Argentina, 1980.

PROYECTO HIDROMETEOROLÓGICO CENTRO AMERICANO, Estudios Hidrológicos, Publicación N° 70, Naciones Unidas, Programa para el Desarrollo, OMM, San José-Costa Rica, 1972.

REMENIERAS G., Tratado de Hidrología Aplicada, Editores Técnicos Asociados S.A., 1974.

RICO NEGRETTY J., La Teoría de las Masas de Aire y los Frentes en Sud América, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Colonización, Dirección General de Meteorología, La Paz-Bolivia, 1946.

ROCHA N. , Balances Hídricos en varias localidades Bolivianas, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, La Paz-Bolivia, 1984.

UNESCO/ROSTLAC, Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, ROSTLAC, Montevideo-Uruguay 1982.

Datos Meteorológicos de los Archivos de la Dirección de Meteorología e Hidrología. Central La Paz y Regional Cochabamba.

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL

CUENCA DEL RIO ITENEZ*

Carlos CRUZ LL.

PHICAB, C.P. 9214, La Paz, Bolivia

La cuenca hidrológica del río Iténez tiene un área de drenaje de 303.300 Km², compartida entre Bolivia y Brasil, y ubicada en la formación denominada Llanura Beniense. Se encuentra encerrada en la cordillera oriental y el escudo brasileiro, estando gran parte del área de la cuenca cubierta de agua (Bañados).

La llanura tiene una altura de 200 a 300 m.s.n.m.. En el límite con el Brasil se levantan varias serranías como las de Huanchaca (750 m.s.n.m.) y Dos Parecís (1250 m.s.n.m.).

El régimen pluviométrico se caracteriza por precipitaciones del tipo frontal. La precipitación media anual muestra una variación gradual de 1000 mm a 1600 mm en la llanura. Estas aumentan en las serranías a 2000 mm. En general, la distribución de la precipitación es uniforme en la cuenca.

Debido al ingreso de las masas de aire caliente húmedo amazónico, por el valle y escudo Brasileño, el clima en la cuenca es tropical, con temperaturas medias de 23° C en las serranías y en el llano 27° C.

La evapotranspiración real en la llanura, de sur a norte, es de 1100 mm a 1400 mm, y en lo que corresponde a las partes altas, la ETR varía de 1200 a 1350 mm.

En la cabecera de la cuenca, el río es de régimen torrencial. Aguas abajo, el río Iténez se encuentra en la llanura y es de régimen laminar. El coeficiente de escurrimiento es bajo 0.17 en la cuenca.

Para determinar las relaciones cuantitativas que se establecen y para representar el equilibrio del balance hídrico, estudiado en un período de 15 años, ha sido necesario considerar la evaporación de los bañados. Los resultados obtenidos son los siguientes:

P = 1504 mm ETR = 1223 mm E = 1306 mm R = 255 mm

siendo P, ETR y R, la precipitación, la evapotranspiración y el escurrimiento, y en el caso de los bañados, E, la evaporación directa.

Con estos resultados se ha obtenido un caudal $Q = 2368 \text{ m}^3/\text{s}$, el que ha sido comparado con caudales generados por el método de Langbein, $Q_m = 2372 \text{ m}^3/\text{s}$. Todos estos valores tienen porcentajes de diferencia bajos.

* No habiendo recibido del autor el texto completo correspondiente a este artículo, los editores han visto por conveniente publicar el presente resumen.

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RIO MADRE DE DIOS

Néstor ABASTO L.

S.N.H.B., C.P. 5962, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

Objetivo del balance

La imperiosa necesidad de realizar una investigación integral de los recursos hídricos de Bolivia, como un primer estimador, requiere la elaboración de un balance hídrico superficial que permita a corto y mediano plazo la evaluación y cuantificación de los recursos de aguas superficiales disponibles.

Consecuentemente, el balance hídrico superficial de la cuenca del río Madre de Dios está orientado a cumplir con los objetivos mencionados anteriormente, tomando en cuenta la naturaleza geopolítica de la cuenca. Las aguas de curso sucesivo compartidas entre Perú y Bolivia correctamente administradas, puedan viabilizar a corto plazo la formulación de múltiples proyectos que brinden a ambos países un sostenido desarrollo.

Antecedentes

El cronista real de las Indias, Garcilazo de la Vega, cuenta que el río Madre de Dios, conocido como Amaru Mayu (río serpiente en quechua), fue ampliamente conocido durante el imperio Incaico, siendo el Inca Yupamqui quien se sirvió de este bello curso de aguas para enviar a un gran ejército a combatir y conquistar a los pueblos de Moxos que habitaban las exuberantes llanuras y selvas de la Amazonia boliviana.

Posteriormente, durante la colonia y la vida republicana, intrépidos exploradores y aventureros peruanos, como el Cap. Manuel Escobar, el Cnel. Faustino Maldonado, Fermín Fitzcarral y otros, incursionaron en la zona a fin de sentar soberanía por una parte, y por otro lado explotar los recursos naturales como ser oro, goma, castaña y maderas preciosas.

Paralelamente, científicos extranjeros y exploradores bolivianos, como Nicolás Armentia Ugarte, Ciro Bayo, José Manuel Pando, Marius del Castillo y otros, meritorios ciudadanos, se preocuparon por conocer, estudiar y delimitar este vasto territorio heredado de la colonia, precisando las coordenadas geográficas de los límites internacionales, el origen de las nacientes y desembocadura de los ríos Heath, Tambopata, Imambary, afluentes principales del Bajo Madre de Dios. El resultado de estas exploraciones, lamentablemente, no permitieron cuantificar los caudales aportados por cada uno de los ríos mencionados con anterioridad.

Por lo tanto, tomando en cuenta esta carencia total de conocimiento sobre el régimen hidrológico de los ríos más importantes de la Amazonia boliviana, en el año 1982, en virtud a un convenio firmado con la misión ORSTOM de Francia y el SENAMHI, se funda el Proyecto PHICAB, con el objetivo fundamental de instalar una red hidrométrica con carácter permanente, gracias al cual ha sido posible, por primera vez, conocer con exactitud el régimen hidrológico de los ríos Madre de Dios, Orthon, Beni, Mamoré e Itenez.

MAPA HIDROGRAFICO DE BOLIVIA UBICACION DE LA CUENCA

ATLAS GEOGRAFICO DE LA
REPUBLICA DE BOLIVIA



Ubicación del área de estudio

REFERENCIAS

HIDROGRAFIA:

Divisorio de Cuencas	_____	
Cuenca del Beni	_____	
Cuenca del Potosí	_____	
Cuenca del Inca	_____	
Salada	_____	
Lago Espino	_____	
Mano Cultivada	_____	
Baldíos: Salada o inundable	_____	

MUJECES OBLITERADOS:

Capitales de Departamentos	_____	
Poblaciones importantes	_____	
Fuertes	_____	

Fig: 6 1

Naturalmente consecuentes con los trabajos de evaluación y cuantificación de los recursos hídricos a nivel nacional, los técnicos nacionales y extranjeros vislumbraron la imperiosa necesidad de realizar los Balances Hídricos Superficiales en estrecha coordinación con el IHH y el Programa UNESCO/ROSTLAC, encargada de preparar la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur, de importancia transcendental en la hora presente para un mejor conocimiento de las reservas de aguas superficiales disponibles en cada uno de los países.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LA CUENCA

Ubicación y superficie

La cuenca del río Madre de Dios se encuentra localizada entre las coordenadas geográficas de 11° a 14° 40' y 62° a 72° 30' de (Fig. 1).

El ámbito geográfico para realizar el estudio del balance está constituido por una gran parte de los departamentos de Puno, Cuzco, Ucayali y todo el departamento del Madre de Dios en territorio peruano, Norte de La Paz, Beni y Pando en Bolivia.

El río Madre de Dios, nace en las estriaciones de la cordillera oriental de los andes peruanos y está constituido por los ríos Manu, alto Madre de Dios, Tacuatimanu o de Las Piedras, Inambari, Medio Madre de Dios, que convergen cerca de la población de puerto Maldonado. A partir de este punto el río se denomina Bajo Madre de Dios, que penetra en Bolivia a la altura del paralelo 12° 30' en la localidad fronteriza de Puerto Heath. Desde este punto recorre en dirección SO-NE hasta Ríberalta, donde se reúne con el río Beni.

La superficie total de drenaje es del orden de los 125000 km², de los cuales 76,2% pertenecen al Perú y 23,8% a Bolivia. Por otra parte, se ha establecido que la parte andina representa un 33,6% hasta la curva del nivel de los 500 m.s.n.m. y el 66,4% se encuentra cubierto por la selva de la Amazonia.

Fisiografía y geología

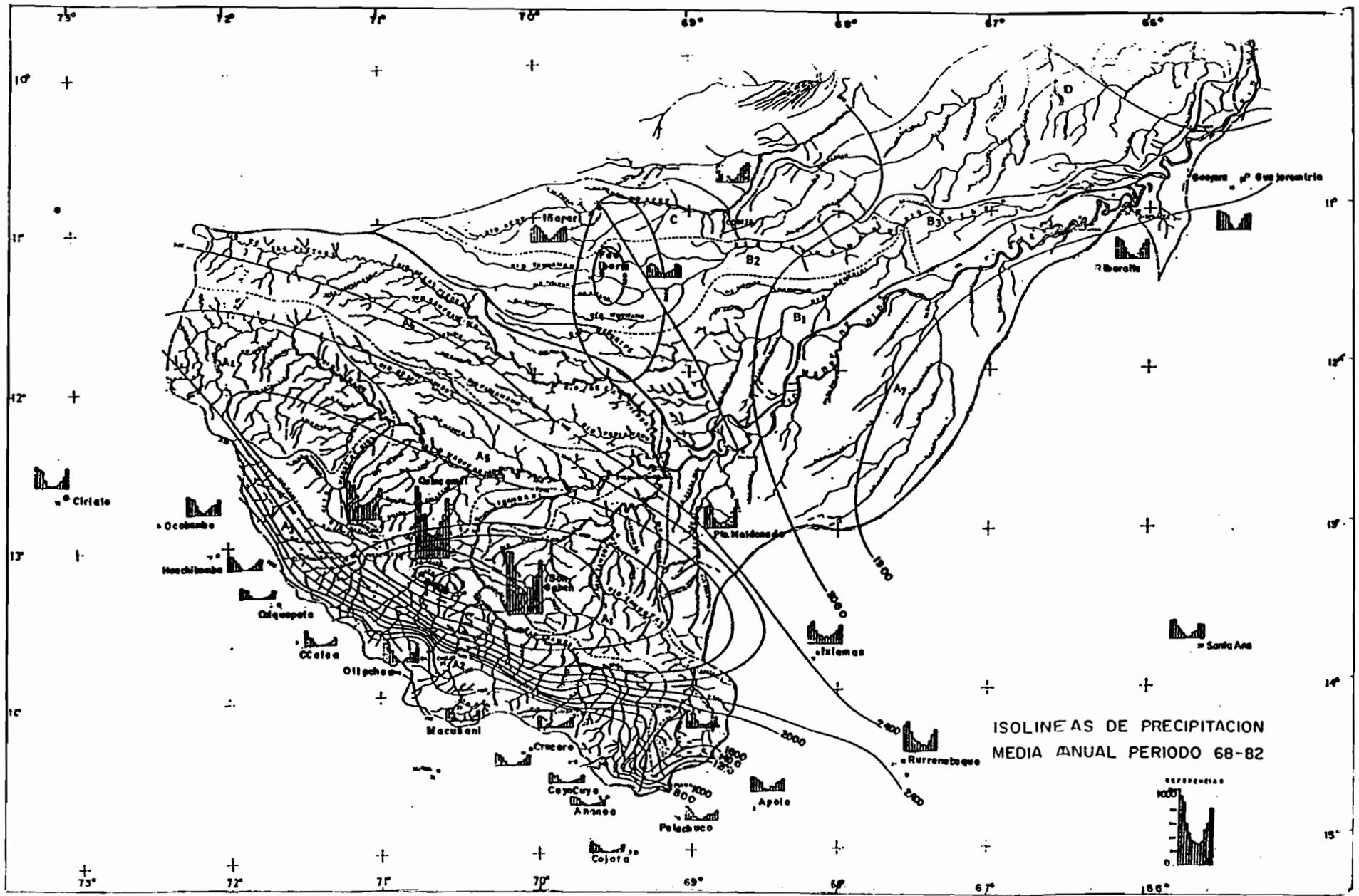
La fisiografía de la cuenca es muy variada, comprendiendo la región andina oriental que es un verdadero sistema orográfico intensamente plegado. Su topografía montañosa varía entre las altitudes de 6500 a 1500 m. Esta región se caracteriza fundamentalmente por estar sometida a una intensa erosión constituyéndose en uno de los principales aportadores de sedimentos.

La región subandina, está conformada por una serie de serranías que constituyen un elemento estructural interpuesto entre los andes y las planicies orientales. En medio de estos plegamientos hay valles sinclinales angostos y anchos. Sus alturas oscilan entre los 2200 y los 300 aproximadamente.

La región perimontano o pie de monte, comprende una amplia zona de pie de monte que baja desde el frente subandino norte de Bolivia y gran parte del departamento del Madre de Dios en el Perú, debido a que el material transportado por los ríos que bajan de la cordillera pierden capacidad de arrastre cuando llegan a la llanura, que tiene poca gradiente depositando gravas finas y arenas en una especie de abanicos aluviales.

La llanura beniana está constituida por los llanos del norte de La Paz y del Beni. El relleno está formado por sedimentos no consolidados terciarios y cuaternarios (arena, limo, arcilla). Finalmente, podemos concluir señalando que las áreas cultivadas, cuerpos de agua y tierras húmedas, de acuerdo al mapa de cobertura vegetal y uso actual de la tierra (GEOBOL), resultan mínimos respecto a la superficie total de la cuenca, lo cual permitió confirmar que el parámetro de la evapotranspiración real (ETR) a nivel puntual y espacial es el más significativo.

FIG.- 2



En lo que concierne a los suelos, la cuenca pertenece a cinco provincias pedológicas según el estudio del Dr. Thomas T. Cochran. En la cordillera oriental de los Andes, los suelos son poco profundos, constituidos por areniscas terciarias igualmente susceptibles a la erosión y de estructura pedregosa.

En la zona norte del departamento de La Paz, los suelos son de tipo podsólico amarillento pertenecientes a aluviones del Cuaternario. En cambio, los suelos pertenecientes al departamento de Pando, próximo a los ríos, son mejor drenados y más fértiles. Están constituidos por aluviones del Cuaternario correspondientes al escudo brasileño.

Finalmente, es importante señalar que la casi totalidad del territorio de Pando y las áreas circunvecinas en territorio peruano, están constituidos por areniscas terciarias, presentando un drenaje fácil a moderado.

Climatología e hidrología

Las situaciones climáticas experimentadas en la cuenca en general son las siguientes:

La sierra peruana comprende los valles interandinos y las vertientes orientales, cuya configuración orográfica es muy variada. Los factores climáticos indican fluctuaciones muy marcadas en lo que respecta a temperaturas y precipitaciones. La estación de lluvias en la cordillera de los Andes peruanos registra promedios bajos o muy altos como los que se indica en Macusani, Ollachea, Limbani, Cuyo Cuyo, Sina.

La zona de los valles de Inambari y Tambopata y la ceja de montaña en territorio peruano que tiene como límite altitudinal los 500 a 3500 m, las temperaturas promedio alcanzan de 23 a 24.5°. Las precipitaciones son intensas, particularmente en la sub cuenca del río Inambari, donde se encuentran ubicadas las estaciones de Quincemil y San Gaban, con promedios anuales superiores a los 6000 m (Fig. 2).

Finalmente, esta zona se caracteriza por su gran inestabilidad debido a que el aire amazónico de origen atlántico, muy reciclado, encuentra la barrera de los Andes. Además de efectos orográficos incluye solamente la convección diaria del aire. Los meses más lluviosos son enero y febrero.

En lo que concierne a la selva baja o llanura amazónica Perú-boliviana, cuyo límite altitudinal varía de 250 a 100 m.s.n.m., presenta precipitaciones medias del orden de los 2000 a 1900 mm con temperaturas que fluctúan entre los 25° a 27° C.

Las estadísticas hidrométricas disponibles en la cuenca del río Madre de Dios, fueron recolectadas en la estación de Miraflores, perteneciente al proyecto PHICAB desde noviembre 1983. Esta estación hidrométrica es la única disponible a lo largo del curso del río, constituyéndose en un punto de control fundamental para el estudio de los recursos hídricos. Se encuentra ubicada a 73 km aguas arriba de la confluencia con el río Beni, cuyas coordenadas geográficas son 11° 02'55" S y 66° 19' 24" W.

En base a los registros fluviométricos recolectados en la estación de Miraflores, desde noviembre 1983 a febrero de 1987, fue posible definir a través de los caudales medios diarios y mensuales, el orden de magnitud del escurrimiento medio anual probable aportado por la cuenta para luego ser contrastado con el caudal obtenido por semejanza de cuencas. Los hidrogramas correspondientes a los períodos 1984-1985-1986 nos permitieron visualizar el comportamiento de las máximas crecidas ($11848 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), las cuales se presentan durante 4 a 5 meses principalmente de enero a abril, destacándose una sucesión de crecidas y descensos bastante significativos.

Division de Unidades Hidrológicas

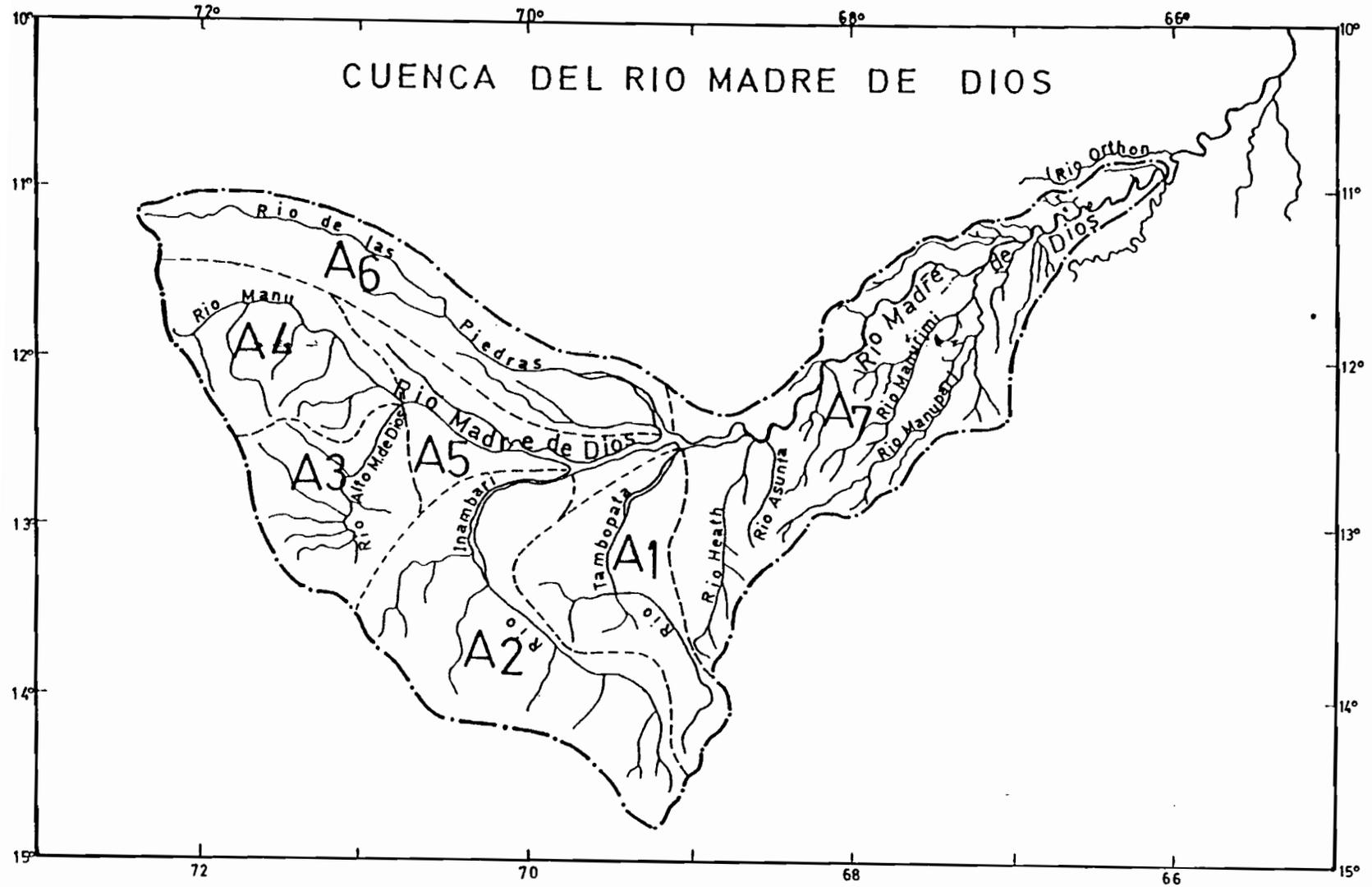


Fig: 3

ESTUDIO DE LOS PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL

El estudio de los parámetros componentes del balance hídrico superficial como ser la precipitación, evaporación y escurrimiento, fueron profundamente analizados. En efecto, se realizó un tratamiento estadístico riguroso de los parámetros hidrometeorológicos a fin de garantizar resultados confiables para el periodo 1968-1982.

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL

Balance hídrico superficial de la cuenca

Los resultados del cálculo del balance hídrico superficial de la cuenca del río Madre de Dios se encuentran resumidos en el cuadro N° 1 para cada uno de los parámetros estudiados. El contenido del cuadro consigna en primer término el balance parcial para cada una de las sub cuencas consideradas por razones metodológicas, asumiendo que el término de discrepancia sea nulo ($\Delta = 0$) a fin de estimar las escorrentías y finalmente los caudales específicos de cada sub cuenca.

En segundo término, las discrepancias encontradas entre el caudal estimado por balance para toda la cuenca y los respectivos caudales calculados por tres métodos diferentes, arrojan los siguientes resultados 6,28%, 0,13% y 3,93%, los cuales se encuentran dentro del rango de error admisible.

Discrepancias y comentarios

El término de discrepancia resulta mínimo (3,7%) para el balance de toda la cuenca, en base a la escorrentía estimada por semejanza de cuencas, lo cual se considera aceptable tomando en cuenta el carácter preliminar del balance. Por otra parte, el término de discrepancia para el balance de toda la cuenca, en relación a la escorrentía estimada por los métodos diferentes, arrojó un 2%.

Los coeficientes de escurrimiento presenta valores máximos en las sub cuencas de los ríos Tambopata, Inambari, Alto madre de Dios, Manu y Medio Madre de Dios y valores mínimos en las sub cuencas de las Piedras y bajo Madre de Dios.

CONCLUSIONES

El balance hídrico superficial de la cuenca total del río Madre de Dios, con todas las limitaciones señaladas, ha permitido estimar con carácter preliminar los siguientes resultados: precipitación media 1715 mm, evapotranspiración real (ETR) 1107 mm, escorrentía media 1507, mm con un error de discrepancia del orden de 3,7%.

La información técnica obtenida por el estudio constituye un aporte valioso para las autoridades gubernamentales de ambos países dedicados en el presente a formular proyectos de desarrollo regional e integración fronteriza, particularmente en lo que responde al uso racional de los recursos hídricos y conservación del medio ambiente.

Cuadro N° 1
Balance Hídrico Superficial de la Cuenca "A" - Río Madre de Dios

SUB CUENCA	AREA DE DRENAJE	PRECIPITACION <P>		ESCORRENTIA <R>			EVAPOTRANS-PIRACION REAL <E T R>		DISCREPANCIA <P> <R> <ETR>			COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO
		Km ²	mm	Km ³	l/s Km ²	mm	Km ³	mm	km ³	mm	Km ³	
A1 -Tambopata	15.540	3.630	56.41	80	2.518	39.13	1112	17.28				0.69
A2 -Inambari	20.160	2.760	55.64	65	2.058	41.49	702	14.15				0.75
A3 -Alto M.D.	8.570	2.871	24.60	67	2.111	18.09	760	6.51				0.74
A4 -Manu	13.210	3.074	40.61	70	2.195	29.00	879	11.61				0.71
A5 -Medio M.D.	13.860	3.217	44.59	65	2.064	28.61	1.153	15.98				0.64
A6 -Las Piedras	19.630	2.327	45.68	35	1.100	21.59	1.227	24.09				0.47
A7 -Bajo M.D.	33.940	2.110	71.61	21	677	22.98	1.433	48.64				0.32
Acumulado												
(Total cuenca M. de Dios por Balance)	124.910	2.715	339.13	51	1.608	200.89	1.107	138.28				0.59
P/Semejanza de cuenca	124.910	2.715	339.13	47.8	1.507	188.24	1.107	138.28	101.	12.62	3.7	0.56
P/Promedio	124.910	2.715	33.13	49.2	1.550	194.00	1.107	138.28	58	7.24	2.14	0.57

BIBLIOGRAFIA

UNESCO, 1982. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Rostlac - Montevideo, Uruguay .

O.M.M., 1970. Guía de prácticas hidrometeorológicas, segunda edición. Secretaría de la Organización Mundial. Ginebra (Suiza).

LINSLEY, KOHLER, 1977. Hidrología para ingenieros MCRAW. Hill Latinoamericana S.A.

LINSLEY, R.K., FRANZINI J., 1979. Ingeniería de los recursos hidráulicos. CECSA. Décima impresión.

INTITUTO ITALO LATINOAMERICANO,1982. Estudio de la hidrología del Perú.

HUFTY A., 1987. Introducción a la climatología. Editorial Ariel S.A., Barcelona.

HOLDBRIDGE L.R., UNZUETA O., JOSI J.A. 1975. Mapa Ecológico de Bolivia. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios. La Paz.

ESPINOZA TORRICO O., 1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del río Beni. Proyecto de grado.

GARCIA HUNHN, W.A., 1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del río Mamoré. Proyecto de grado.

EL CLIMA DE BOLIVIA

Michel-Alain ROCHE

ORSTOM, B.P. 5045, 34032 Montpellier, Francia

INTRODUCCION

Las condiciones climáticas reinantes en Bolivia son muy variadas según las regiones, en razón de una orografía poco común y de una situación intertropical. Estas condiciones regulan la distribución de los recursos renovables, y representan para el país un factor de riqueza excepcional para numerosos sectores del desarrollo, pero también un factor limitante en ciertos casos. Aunque ello puede ser válido para cualquier país, más aún en Bolivia, las relaciones entre el clima y los volúmenes de agua disponibles aparecen, por tanto, como un conocimiento esencial para el aprovechamiento nacional (Fernández-Jáuregui et al., 1987; Roche, 1988).

El Programa Hidrológico y Climatológico de Bolivia (PHICAB) ha presentado, desde el principio, resultados climatológicos sintéticos en forma de mapas a escala de las grandes cuencas y del país. Aseguró la interpretación de éstos en relación con la dinámica de las masas de aire. Asimismo, la relación de los términos climatológicos con los recursos hídricos, que nunca había sido realizada en esta misma escala, fue llevada a cabo en el marco de la elaboración del balance hídrico.

La investigación sintética sobre la climatología se ha hecho entonces en este sentido, tratando, en prioridad a nivel nacional, los términos relativos a las precipitaciones, las temperaturas y la evapotranspiración. Pareció esencial entender los grandes mecanismos que determinan las variaciones en el espacio y el tiempo, y disponer de valores en cualquier punto o cuenca. Fueron llevados a cabo estudios detallados del conjunto de los términos climáticos, así como un análisis estadístico más profundizado, en dos grandes cuencas amazónicas, en los Andes y los Llanos, en régimen húmedo y semiárido.

El relieve tiene un rol importante en la distribución de las precipitaciones sobre Bolivia y el funcionamiento hidrológico de las cuencas. Por tanto, ha parecido útil disponer, en la misma escala que la de los otros mapas, de un mapa orográfico, que fue trazado sobre la base del fondo topográfico IGM al 1/1.000.000

Ocho grandes cuencas hidrográficas, que cubren la casi totalidad del país fueron estudiadas en forma individual, siendo cada una de ellas objeto de tesis de grado preparadas en el marco del PHICAB y presentadas a la UMSA. Esta memoria constituye la síntesis de estos resultados producidos por Abasto (1987), Arellano (1988), Cruz (1987), Espinoza (1985), Frías (1989), García (1985), Lozada (1985), Mariaca (1985). En algunos casos se introdujeron modificaciones mínimas con vistas a la armonización de los resultados entre cuencas. Algunos trabajos complementarios de Roche y Rocha (1985); Benavidez (1988); Herbas (1987); Roche et al. (1986, 1990, 1991) contribuyeron a los estudios de detalle o de síntesis de esta memoria. Ronchail (1985, 1986, 1989) ha estudiado también la estadística de las situaciones meteorológicas y sus efectos sobre las precipitaciones y temperaturas. Se dio una atención particular a la intrusión de los frentes fríos en Amazonia.

A fin de respetar normas únicas para el conjunto del continente, la metodología utilizada fue la preconizada por la UNESCO (1982).

LAS PRECIPITACIONES

Distribución estacional de las precipitaciones

La similitud de los hietogramas mensuales interanuales de toda Bolivia, tal como figuran en la carta pluviométrica, muestra la pertenencia de toda esta región a un mismo régimen pluviométrico.

La estación lluviosa se centra en el verano con un máximo en enero y en segundo lugar en febrero. Se inicia generalmente en diciembre para concluir en marzo. La estación seca es en invierno, con un mínimo de mayo a julio. Dos períodos de transición separan estas dos épocas, uno en abril y otro de septiembre a noviembre.

En el conjunto del país, un total de 60 a 78% de las precipitaciones ocurren durante los cuatro meses más lluviosos, y de 0 a 15% durante los cuatro meses más secos. El período seco es tanto más severo cuanto más reducido es el total anual. En la cuenca del lago Titicaca, según la subcuenca, 65 a 78% de la precipitación anual se acumula durante los cuatro meses de la estación seca. Los dos períodos intermedios corresponden a una precipitación de 18 a 29%. En el conjunto de la cuenca, estos valores respectivos son de 70% y 25%, ya que el período seco no acumula más que un 5%.

Tomando períodos plurianuales, la influencia del fenómeno de El Niño se traduce en una tendencia seca durante los episodios más acentuados (Molion, 1991, Roche et al., 1990).

Distribución espacial de las precipitaciones

A partir de las regiones amazónicas del pie de monte de los Andes marcadamente bañados (6000 a 7000 mm año⁻¹), el cruce de la cordillera por 400 Km conduce al desierto chileno y peruano, uno de los más extremos del mundo con menos de 1 mm año⁻¹ a lo largo de la costa del océano Pacífico. En Bolivia, las precipitaciones mínimas se sitúan al sudoeste del salar de Uyuni, con valores del orden de 100 mm año⁻¹ (Roche et al., 1990, Aquize, 1980). La carta de isoyetas muestra la distribución espacial de las precipitaciones medias interanuales del conjunto de la región hidrológica tomada en cuenta.

En la llanura adyacente a los Andes, los valores crecen desde 600 mm año⁻¹ en el sur hasta 2000 mm año⁻¹ al norte, según isoyetas en forma de canal cuyo eje se ubica sobre los ríos Pilcomayo, Parapeti, Negro, Iténez y Mamoré. La lluvia aumenta así en dirección al Escudo Brasileño y los Andes. Un poco antes o sobre el primer relieve de los Andes se observan las máximas del país, con más de 6000 mm año⁻¹.

En la cordillera oriental se encuentran también zonas aisladas con lluvias inferiores a 500 mm año⁻¹, como en la región de Cochabamba. Es el caso general en el sur de la cadena donde se identifican mínimos de 300 mm año⁻¹. Las precipitaciones son allí más elevadas en la parte situada al noroeste de Santa Cruz que en la que se extiende al sur, si bien se observan concentraciones de fuerte precipitación todavía en los primeros relieves de la cadena.

La vasta meseta del Altiplano recibe precipitaciones superiores a 500 mm año⁻¹ al norte de la latitud de La Paz. En la cuenca del lago Titicaca las isoyetas son globalmente concéntricas al lago, en el centro del cual se observan precipitaciones superiores a 1000 mm año⁻¹. Las lluvias tienden a disminuir a medida que aumenta la distancia del lago, hasta mínimas de 600 a 500 mm año⁻¹, así como hacia el oeste, donde sobre la cuenca alta del río Coata, en Perú, las máximas pueden sobrepasar los 1000 mm año⁻¹. En dirección al sur, las lluvias disminuyen desde el centro del lago hasta el salar de Uyuni donde la pluviometría se torna inferior a 200 año⁻¹.

Las cimas de la Cordillera Occidental corresponden a un ligero aumento de las precipitaciones hasta valores de 300 a 500 mm año⁻¹. Sobre la vertiente pacífica chilena la precipitación disminuye rápidamente, con valores inferiores a 1 mm año⁻¹ al borde

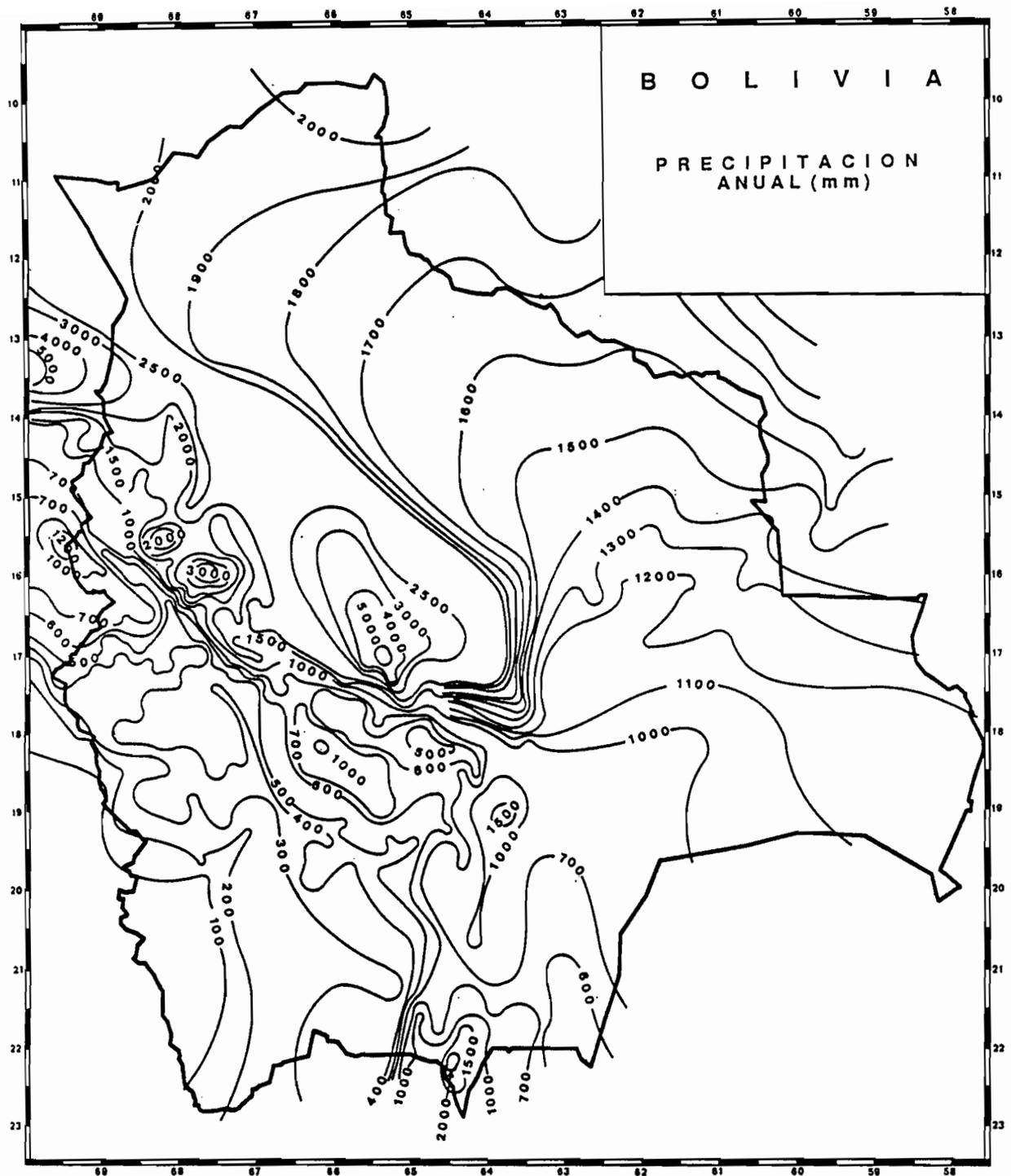


Fig. 1 : Mapa de las precipitaciones interanuales (1968-1982) en Bolivia

del mar.

Precipitaciones y dinamica de las masas de aire

La distribución de las lluvias se explica por la dinámica de las principales masas de aire activas en esta parte de América del Sur, y por el rol orográfico de los Andes, tanto a escala continental como a escala del valle (Roche et al., 1990)

Las masas de aire atlántico y amazónico

La cuenca amazónica es generalmente un centro de bajas presiones con respecto a los anticiclones del Pacífico Sur y del Atlántico. La dinámica del conjunto está regulada esencialmente por la inclinación aparente del sol que determina la oscilación estacional de la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) y de los citados anticiclones (Roche, 1988).

Durante el invierno austral, la ZITC alcanza las Antillas y los anticiclones tropicales meridionales retornan a sus latitudes más septentrionales, vecinas a la cuenca amazónica de Bolivia. Es la estación seca, caracterizada por una mejor estabilidad del aire y una menor disponibilidad de vapor de agua.

Durante el verano austral, la ZITC oscila sobre la Amazonia boliviana, donde su notable inflexión hacia el sur extiende ampliamente las bajas presiones tropicales. Tiene lugar entonces la estación lluviosa, que determina finalmente la distribución espacial de las precipitaciones, teniendo en cuenta la importancia relativa de la lámina precipitada durante este período.

Los vientos alisios del sector noreste se desvían a lo largo de los Andes según la inflexión sur-sureste de la cadena. Aportan sobre Bolivia lo esencial del vapor precipitable originario del Atlántico al norte del Ecuador, pero que se ha reciclado ampliamente a partir de la evapotranspiración de la selva y de las vastas zonas inundadas. Estas últimas, solamente en la llanura boliviana, cubren unos 100.000 km² al finalizar la estación lluviosa. Los alisios del sector sudeste contribuyen al aporte de humedad directamente desde el este y el sudeste. Los alisios del hemisferio norte, que barren todo el "Mar Amazónico" durante la estación lluviosa, tienen una incidencia pluviogénica mucho mayor que los alisios del hemisferio sur que ya han atravesado los relieves del borde atlántico. Por esta razón, el sur de Bolivia es menos lluvioso que el norte.

En el norte del Altiplano, el aire húmedo rebasa periódicamente las cumbres de la Cordillera Oriental, situadas entre 4500 m y más de 6400 m, principalmente en la estación lluviosa. Los alisios, sobre todo el del sector noreste, aportan de esta forma el agua al sistema hidrológico de los lagos Titicaca y Poopo, así como a los salares, si bien en inferior cantidad en la vertiente del Altiplano, que en el flanco oriental amazónico. La convección diurna de esta humedad, tanto en la planicie como en los Andes, es responsable de gran parte de las precipitaciones. Corresponde por lo tanto, al reciclaje de vapor de agua transportado por los alisios (Villa Nova et al, 1976; Fränzel, 1979; Jordan y Jevveldop, 1981; Salati et al., 1984).

Las masas de aire meridional

El sistema anteriormente descrito, se ve perturbado con frecuencia por la intrusión, en la planicie adyacente a los Andes, de aire más frío y seco proveniente del sur (Surazo), con la formación de un frente frío por contacto con las masas de aire húmedo y generalmente más cálido, que ocupan la región. La progresión de las masas de aire frío ha sido explicada por Leroux (1987) según el mecanismo de anticiclones móviles poco espesos que se separan del anticiclón antártico y avanzan hasta las bajas latitudes apartando las restantes masas de aire oriental y amazónico. La distribución pluvial en la llanura, según una inflexión de isoyetas en canal y un fuerte incremento de los valores de sur (600 mm año⁻¹) a norte (2000 mm año⁻¹), denota la interferencia de las dos masas de aire. El aire seco

proveniente del sur se ve canalizado por la depresión topográfica (500 a 150 m), situada entre los Andes y el Escudo Brasileño (1500 m). El descenso de las temperaturas que acompaña los frentes fríos puede alcanzar 10°C de un día para otro, y las caídas de las lluvias son notables en las mayores intrusiones del invierno, más allá de los 10° de latitud sur en la planicie y el sur de los Andes bolivianos (Ronchail, 1989). Estas masas de aire frío atraviesan frecuentemente los Andes del sur de Chile, perdiendo su humedad, y siguiendo luego por el borde oriental de la cordillera.

Las oscilaciones de la ZITC y de los alisios asociados, y las perturbaciones del sistema por los frentes fríos provocados por la intrusión de aire frío meridional, son los grandes mecanismos que interesan el sur de los Andes y toda la llanura oriental.

Según Ronchail (1988), el Altiplano no sería afectado por estas masas de aire frío cuyo espesor es inferior a la altura de la meseta. Parece, de hecho, que el rebasamiento de los flujos alisios húmedos sobre las líneas de las crestas estaría determinada por su espesor. Este se debería a la importancia de las bajas presiones y a la convección producida en la llanura y en la vertiente oriental, así como por la elevación eventual por el aire meridional subyacente. En este caso, las intrusiones del sur juegan un papel con respecto a las precipitaciones sobre el Altiplano.

La masa de aire pacífico

En forma opuesta a las zonas precedentes, la vertiente occidental de los Andes está sujeta en estas latitudes a condiciones de estabilidad atmosférica cada vez más fuertes, desde la cresta que la separa del Altiplano. Estas condiciones son engendradas por la presencia permanente del anticiclón sudpacífico y por la corriente fría de Humboldt asociada al mismo. Si bien la humedad atmosférica en los primeros 1000 m es muy elevada, una permanente subsidencia del aire y una inversión en la estratificación térmica de la troposfera en los 1300 m, impiden el ascenso del aire húmedo y las precipitaciones. En invierno, una capa de estratocúmulos, poco espesa (200 a 300 m), se establece por encima de esta inversión, acompañada de neblinas durante la noche y temprano en la mañana. En invierno esta neblina desaparece frecuentemente al mediodía y se vuelve casi inexistente en verano. En esta vertiente las isoyetas siguen las curvas topográficas. Aunque se puede concebir, como se señala en Perú, una ascensión diurna del vapor del Pacífico a lo largo de las vertientes a causa del calentamiento del suelo, en el paisaje chileno no se ven efectos marcados de este fenómeno.

La barrera de la Cordillera Occidental constituye así el límite de la influencia atmosférica del sector atlántico. Sin embargo, el régimen de precipitaciones estivales por encima de la isohieta 10 mm año⁻¹, sensiblemente por encima de los 1200 m, y con una pluviometría creciente hasta la cresta (200 a 500 mm año⁻¹) como continuación de las precipitaciones del Altiplano, indica un rebasamiento de los alisios orientales sobre esta vertiente. Estos se ven afectados entonces por una subsidencia forzada que hace disminuir las lluvias rápidamente hacia el oeste. En la costa, las escasas lluvias observadas se producen generalmente en invierno. En el extremo sur de la zona considerada, más allá de los 22°S, la incursión accidental de los Westerlies en invierno puede ocasionar lluvias sobre la vertiente occidental de la cordillera, lo que es frecuente a partir de los 27°S.

Rol de la orografía de los Andes

Los efectos del pie de monte de los Andes

Los factores orográficos juegan un rol preponderante en la distribución espacial de las precipitaciones. La desviación de los alisios provenientes de la Amazonia a una dirección sur-sureste por la barrera de los Andes orientales cuyas altas cumbres se escalonan de 4500 a 6400 m, presenta una amplitud regional. Las masas de aire húmedo, aprisionadas con frecuencia entre el aire meridional más seco y el macizo

andino, barren longitudinalmente esta vertiente perdiendo su humedad. Se observan máximas de 5000 a 7000 mm año⁻¹ en el Chapare al este de Cochabamba y en la cuenca del Madre de Dios en Perú, en altitudes bajas en relación a las de la cadena. En efecto, la primera máxima señalada se produce entre los 400 y 800 m de altura, aunque no aparece ningún relieve marcado. El epicentro de la segunda se localiza a 620 m.

Debe señalarse que zonas de mayores precipitaciones, de 2000 a más de 4000 mm año⁻¹, ocurren a lo largo de los Andes, desde Colombia hasta Bolivia, con alturas muy bajas comprendidas entre 150 y 700 m. Estos sitios en Bolivia corresponden a la acentuación del gradiente de temperatura, negativo de la planicie hacia la montaña. Sin embargo, la variación es escasa, las isotermas (1,50 m del suelo) evolucionan de 23°C a 21°C en el epicentro. En el sur de Bolivia, el mapa presenta igualmente zonas de precipitaciones máximas de 1500 a 2200 mm año⁻¹ en los primeros relieves orientales, a alturas de 400 a 900 m.

Se hace notar que las precipitaciones se producen en el límite de los Andes, en "bahías" de relieve con partes cóncavas hacia la llanura, mientras que las partes convexas reciben precipitaciones menores. La disposición cóncava podría favorecer a la convección al abrigo del viento, o un torbellino local ciclónico.

Los efectos de fondos de valles

Algunas extremidades de los valles abiertos al viento de la llanura, en particular el nordeste de La Paz, reciben, a alturas muy superiores a las precedentes (3000 m), fuertes precipitaciones del orden de 2000 a 4000 mm año⁻¹. Se trata de un fenómeno ligado también a la orografía. El perfil longitudinal de estos valles, que termina a menudo río arriba en verdaderos acantilados (ejemplo de un desnivel de 3500 m en 35 Km), obliga a los flujos de las masas de aire a una rápida ascensión que provoca intensas precipitaciones.

Los efectos de pantalla de la Cordillera Oriental

A partir de las zonas de pie de monte, la pluviometría tiende generalmente a disminuir. El frecuente bloqueo del aire oriental por la cordillera pone al abrigo vastas zonas al interior de los Andes, mientras que las nubes forman un techo al este por debajo de la línea de las crestas. El efecto de pantalla y de abrigo bajo el viento, asegurado por las más altas cumbres, se distingue muy particularmente. La masa de aire húmedo amazónico queda entonces frecuentemente bloqueada detrás de éstos, mientras que ésta sobrepasa a menudo las crestas menos elevadas del resto de la cuenca.

En la cuenca del lago Titicaca, la zona de Suchez, abrigada por la Cordillera de Apolobamba cuya altitud alcanza los 6000 m, resulta por ello escasamente bañada. Los mínimos de precipitación sobre la cuenca tienen lugar entonces al sudoeste del Illampu, que es la cumbre más alta de la cordillera (Escoma: 507 mm año⁻¹, Belen: 452 mm año⁻¹).

Los efectos de las depresiones topográficas

Las depresiones topográficas provocan una subsidencia del aire oriental que llega lateralmente después de haber perdido una gran parte de su humedad sobre el flanco este del macizo. A medida que disminuye la altura, la presión y la temperatura del aire aumentan, permitiendo una disminución de la humedad relativa. Las precipitaciones disminuyen del mismo modo.

Es el caso del Altiplano, pero también de toda la mitad sur de los Andes en Bolivia, surcada de amplios valles y zonas deprimidas de origen tectónico. Estas zonas semiáridas (600 a 400 mm año⁻¹) se desarrollan aún más hacia el sur donde la humedad original del aire que alcanza los Andes es menor que en el norte y la influencia pacífica es más frecuente. Los valles de Cochabamba, del Río Grande y del Pilcomayo, del Río La Paz y de Luribay son netamente semiáridos

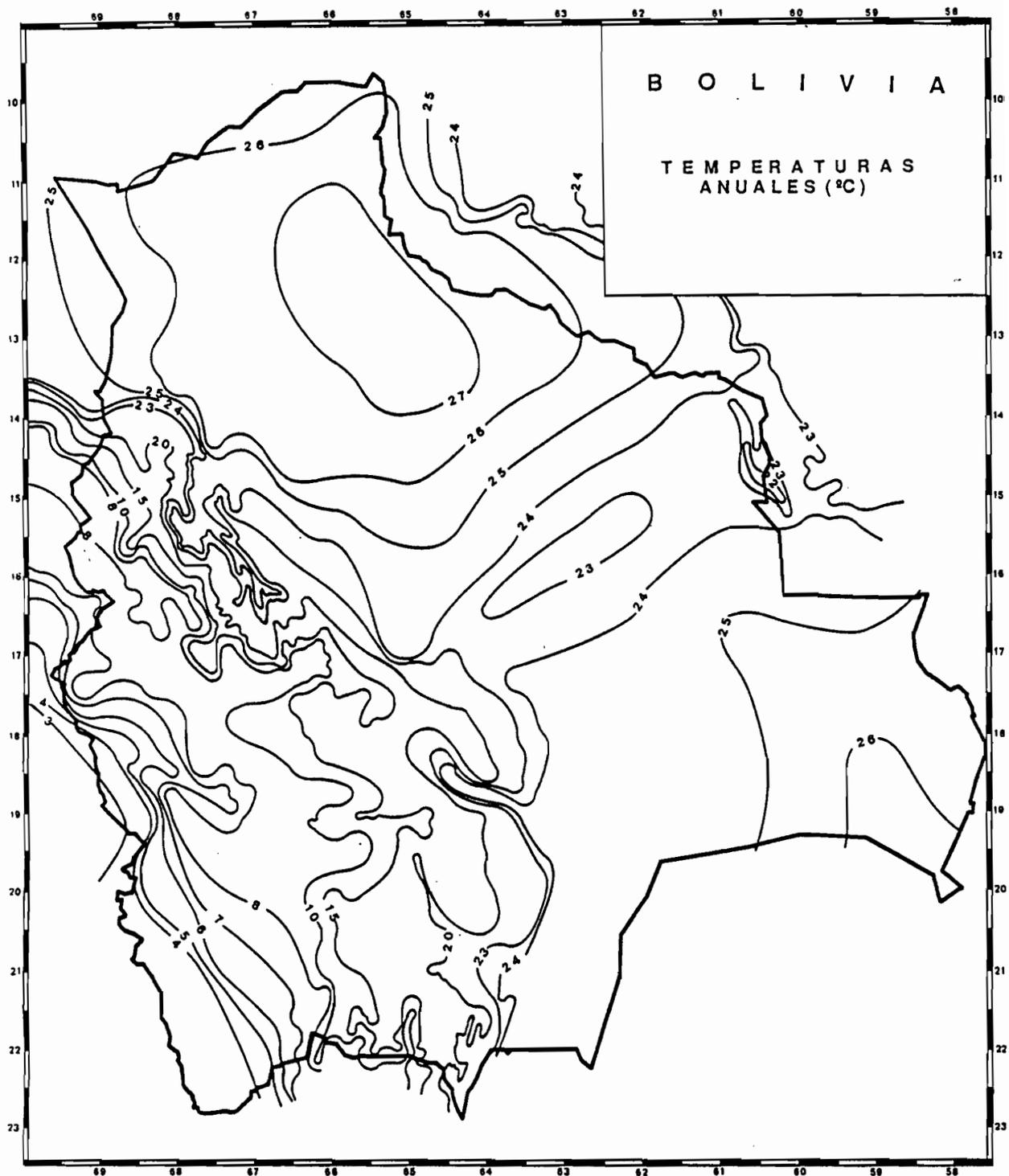


Fig. 2 : Mapa las temperaturas medias interanuales (1968-1982) en Bolivia

Surge entonces que no puede existir en los Andes, salvo en forma muy localizada, una relación general entre la precipitación y la altitud. La heterogeneidad de las precipitaciones sobre la cordillera de los Andes vuelve pues inútil la búsqueda de correlaciones entre la altitud y el escurrimiento para las grandes cuencas.

Influencia de las extensiones de agua y de sal sobre las precipitaciones

La influencia de los grandes espejos de agua y las extensiones de sal resalta igualmente sobre la carta pluviométrica.

El lago Titicaca da origen a un fuerte incremento concéntrico de las lluvias, superiores a los 800 mm año⁻¹ en las orillas, hasta más de 1000 mm año⁻¹ en la parte céntrica.

Los valores disminuyen de 1200 mm año⁻¹ en el centro a 700 mm año⁻¹ a unas decenas de kilómetros de sus orillas. Esta influencia se debe a la vasta superficie de aguas libres ligada a un volumen importante a causa de las grandes profundidades. La gran capacidad de absorción de las radiaciones solares lleva a temperaturas del agua netamente más elevadas (10 a 14°C) que las del aire sobre las tierras circundantes. La restitución térmica de las aguas es entonces progresiva, favoreciendo una evaporación más elevada que en las zonas periféricas así como la convección.

Al pasar sobre el lago, el aire se recalienta enriqueciéndose en vapor de agua. Sufre una ascensión, más fuerte durante la noche en que el contraste de temperatura se acentúa. Esta convección provoca precipitaciones de tipo tormentoso relativamente más fuertes sobre el lago que sobre el territorio.

El aire húmedo del Lago Mayor puede atravesar el istmo de Yunguyo-Copacabana o el estrecho de Tiquina, para pasar sobre el Lago Menor, provocando precipitaciones elevadas sobre la parte occidental de este último, tal como en el Desaguadero (797 mm año⁻¹) o Tiquina (1050 mm año⁻¹). A la inversa, en la parte sudeste del lago, los vientos de NE no barren el Lago Mayor en forma absoluta o suficiente. Estos son desviados parcialmente por el macizo del Illampu o sufren una subsidencia en su flanco oeste. Igualmente, las partes sudeste de los lagos Mayor y Menor son relativamente secas.

El lago Poopo, de superficie más reducida (3600 km²) y fluctuante, no provoca más que un leve aumento de las lluvias (400 mm año⁻¹).

Con respecto a los salares de Uyuni (9100 km²) y de Coipasa (2000 km²), por el contrario, las vastas extensiones de sal corresponden a una disminución de las precipitaciones que no sobrepasa los 200 mm año⁻¹. La misma constatación se hace para el salar de Atacama en Chile (25 mm año⁻¹). Los balances de energía y de la evaporación de los lagos son muy diferentes a los de los salares. Contrariamente a los salares, el lago Titicaca permite la convección y el reciclaje del vapor de agua.

TEMPERATURAS DEL AIRE

Variaciones estacionales de las temperaturas

La carta en curvas isotermas muestra los histogramas de temperaturas medias mensuales para las grandes estaciones climatológicas de la región.

Las temperaturas medias más bajas tienen lugar en julio, en pleno invierno, mientras que las más elevadas se sitúan de diciembre a marzo, centrándose frecuentemente en febrero. Las temperaturas medias mensuales tienen una distribución estacional similar a la de las precipitaciones, con, eventualmente, un mes de retraso para los valores extremos.

La temperatura máxima ocurre en octubre o noviembre, cuando la nubosidad es menos intensa que en pleno verano cuando se produce la máxima precipitación. Por esta misma razón, se observa una máxima secundaria en marzo-abril. A la inversa, la

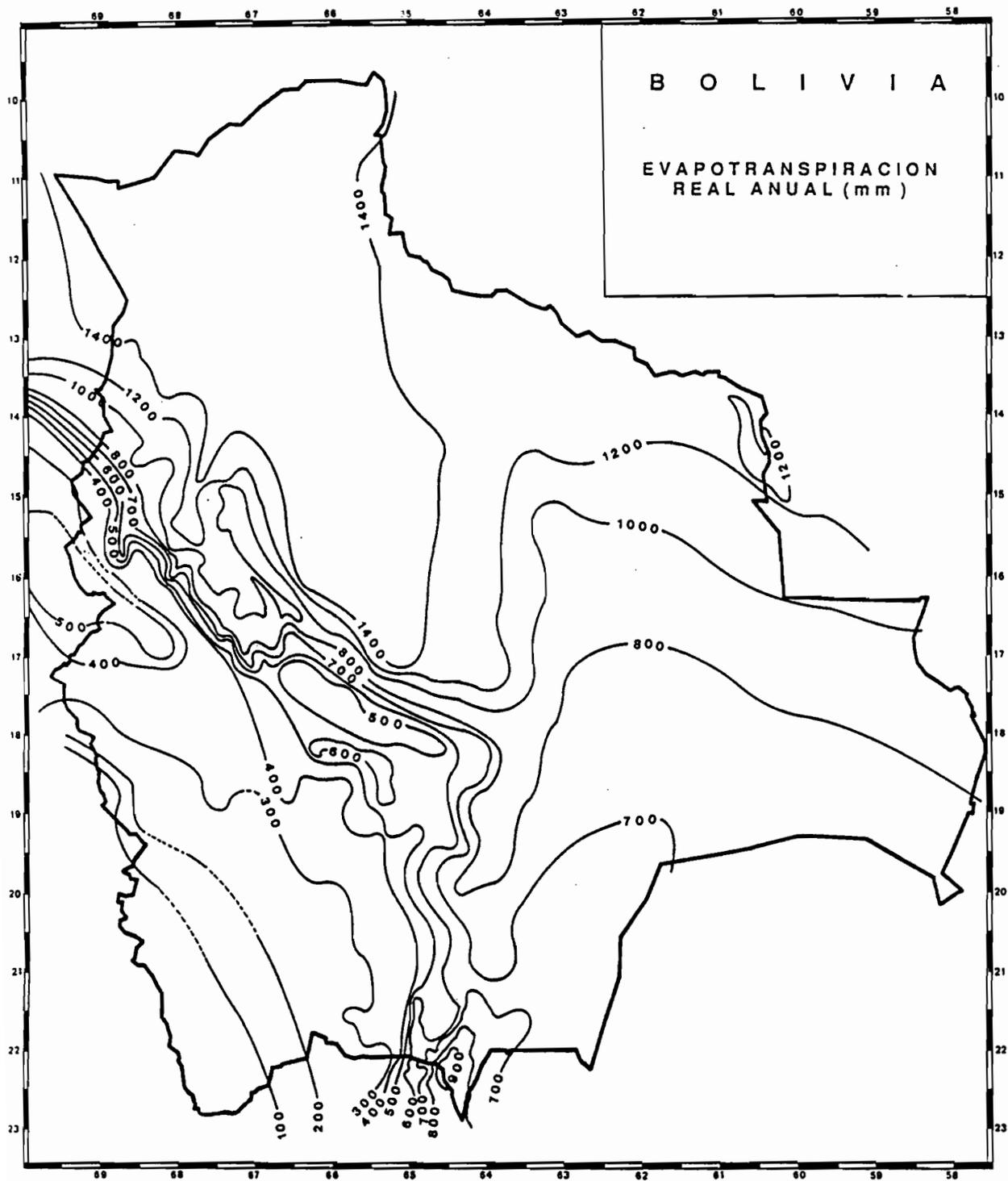


Fig. 3 : Mapa de la evapotranspiracion real interanual (1968-1982) en Bolivia

temperatura mínima se centra en el invierno dado que se produce al fin de la noche y, por lo tanto, poco depende de la duración de las horas de sol.

Distribución espacial de las temperaturas

La carta en curvas de igual temperatura media interanual muestra la distribución espacial de los valores para el conjunto de la región.

Las mayores temperaturas medias anuales se sitúan al centro de los Llanos, con valores que sobrepasan ligeramente los 27°C. Valores igualmente elevados se encuentran en el sudeste de Bolivia. En esta llanura oriental, se observa una mínima del orden de 23°C en el flanco norte de la elevación del relieve que divide la llanura en dos. La escasa variación de la altura no parece explicar por sí sola la diferencia observada.

Al pie de la Cordillera Oriental de los Andes, la temperatura es del orden de 20°C, y decrece con la altura hasta alcanzar 0°C hacia los 5100 m.

En el Altiplano, en las zonas de altitud inferior a 4000 m, las temperaturas medias anuales están comprendidas entre 7 y 10°C. En los alrededores del lago, las mismas son superiores a los 8°C. Se observan temperaturas medias anuales igualmente cercanas a los 8°C en toda la mitad este del Altiplano y sobre el lago Poopo cuya influencia térmica es más reducida que la del lago Titicaca. Debe notarse también que las estaciones comprendidas entre 3900 y 4000 m en el extremo sur y norte de la región del lago Titicaca tienen temperaturas del orden de 7°C. El lago atempera el clima, sobre todo disminuyendo la amplitud, pero no parece ocasionar en su perímetro una elevación de la temperatura media anual mayor a 2°C. Las temperaturas medias decrecen desde el eje del Altiplano hasta las cimas de la cordillera occidental. Al pie de los conos volcánicos, la temperatura media puede alcanzar valores inferiores a 4°C.

El gradiente regional de las temperaturas medias anuales en función de la altitud, determinado con un total de 165 estaciones, es de 0,46°C por cada 100 m. La temperatura ficticia a altitud cero es de 26,8°C. Este gradiente varía según las grandes cuencas. Para el conjunto Madre de Dios y Beni, es de 0,50°C en 100 m con un valor de origen de 27,5°C. En el conjunto Mamoré-Itenez, el gradiente es igualmente de 0,50°C en 100 m, con un valor de origen de 26,1°C. En el conjunto Pilcomayo-Bermejo, estos valores son de 0,37°C en 100 m y 25,1°C. En la cuenca del Altiplano, el gradiente térmico es de 0,76°C en 100 m. Sin embargo, para la zona comprendida entre 3800 y 4000 m, la relación entre temperatura y altitud muestran una gran dispersión debida a los efectos de exposición, de abrigo y de distancia al lago.

EVAPOTRANSPIRACION

Distribución estacional de la ETR

Las curvas de variación estacional de la evapotranspiración según Thornthwaite indican un mínimo de ETP y de ETR en mayo, junio y julio, en pleno invierno que corresponde asimismo a la época de menor lluvia. Existe en ese momento falta de agua para satisfacer la evapotranspiración. El máximo de ETP se sitúa de octubre a marzo o abril, en el verano. Lo mismo ocurre con la ETR dado que existe en ese momento la mayor disponibilidad de agua de todo el año. El mes de mayo corresponde generalmente a una caída severa de la ETR.

Distribución espacial de la ETR

La disponibilidad de agua constituye el factor principal de la ETR, por supuesto, con influencia de otros factores climáticos a ser tomados en cuenta por las fórmulas de evaluación, en particular por la fórmula de Penman. La distribución espacial y temporal de la ETR se encuentra, por tanto, influenciada netamente por la de las precipitaciones. La baja de la ETR corresponde a la disminución general de las lluvias y de las

temperaturas.

La reserva de agua en el suelo contribuye a mantener una ETR elevada por un cierto tiempo después del período lluvioso. En las zonas de escasa pluviosidad, en las cuales las precipitaciones se detienen bruscamente, esta reserva se agota rápidamente. La caída de la ETR es entonces abrupta. Debe resaltarse que en el Altiplano los cultivos se realizan en verano, durante la época lluviosa, por razones de disponibilidad de agua pero sobre todo en razón de las heladas durante el invierno.

El mapa de curvas de igual evapotranspiración real media interanual muestra la distribución espacial de estos valores en la región. Los mayores valores de ETR se sitúan en la llanura amazónica, al oeste del río Beni, donde la lluvia y las temperaturas son más elevadas. Allí los valores sobrepasan 1400 mm año^{-1} , con un máximo de 1460 mm año^{-1} sobre el río Beni. La ETR disminuye enseguida desde el pie de monte de los Andes hasta el extremo sudoeste del Altiplano, donde los valores son inferiores a 100 mm año^{-1} .

CONCLUSION

La heterogeneidad de los términos climatológicos en Bolivia se debe a la confluencia en esta región de grandes masas de aire cuya dinámica regula los intercambios atmosféricos meridianos y latitudinales del hemisferio sur. Sin embargo, las variaciones espaciales se ven aún más acentuadas por los efectos del relieve y de las vastas extensiones de agua y de sal constituidas por el lago Titicaca y los salares. Los Andes, por su orografía excepcional, contribuyen a provocar precipitaciones extremas, ya sea máximas como mínimas, según las zonas. No existe relación general entre las precipitaciones y la altura. La cadena montañosa pone fin a la influencia pluviogénica de las masas de aire tropical húmedo de origen atlántico y amazónico.

La experiencia de estos estudios permite, por otra parte, hacer hincapié sobre recomendaciones para el futuro. Las bajas densidades de estaciones de mediciones climatológicas e hidrométricas han sido factores limitantes de la precisión de las estimaciones. La densidad de la red debería ser incrementada si se realiza un nuevo diseño de la red básica. En particular, en zonas como el sudeste del Altiplano se debería aumentar el número de sus estaciones, y no únicamente en las zonas de baja densidad, tal como la llanura oriental, donde los equipos deben ser prioritarios. Es en realidad en los Andes, donde las estaciones son ya relativamente numerosas, que se siente la necesidad de aumentar la densidad de las estaciones, debido a las fuertes variaciones espaciales de las características climato-hidrológicas que hacen que ciertas zonas climáticas muy particulares y de extensión relativamente importante no están equipadas.

Resulta importante mencionar que, prioritariamente al aumento de la densidad de las redes, la calidad de las observaciones requiere en forma imperativa la realización de visitas periódicas de control sobre el terreno. Es imprescindible que el equipo cuente con un sistema eficiente de transmisión vía satélite.

Por otra parte, debe continuarse con la elaboración de herramientas informáticas específicas de tratamiento de la información climatológica. Gracias a esta primera experiencia de evaluación, llevada a cabo por el Programa PHICAB, se pudo perfeccionar varios programas informáticos que no existían al inicio del estudio, haciendo más rápida y racional la obtención de los términos del balance. Mencionaremos en particular la homogeneización de los datos por VECSPAT (Roche, 1988), el cálculo automático de la lámina de lluvia sobre la cuenca y la disponibilidad del paquete PLUVIOM.

Lo que mayormente deberá desarrollarse en el futuro es la búsqueda de métodos de teledetección para la evaluación regional del balance de radiaciones y de evapotranspiración, en relación con los parámetros climáticos.

Es conveniente continuar las mediciones locales de evaporación. Los datos obtenidos en los tanques de evaporación son de difícil aprovechamiento en razón de la calidad de las observaciones y de la representatividad de las mediciones. Este parámetro es delicado de medir y poco representativo desde el punto de vista espacial. Las mediciones de radiación, salvo en algunas estaciones experimentales temporales, son inexistentes y además muy delicadas de obtener para un número considerable de estaciones. Por lo tanto, debe realizarse un esfuerzo para desarrollar y mejorar estas observaciones que permiten medir la evaporación, y de una forma general, el conjunto de datos climatológicos que sirven igualmente a la estimación del balance de radiaciones y al cálculo de la evaporación a través de fórmulas. Estas observaciones constituyen una necesidad absoluta para las nuevas técnicas de teledetección.

REFERENCIAS

ABASTO N. (1987). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Madre de Dios, Amazonia, Bolivia-Perú. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 295 p.

ARELLANO R. (1988). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Pilcomayo. Río de La Plata, Bolivia, Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 101 p.

BENAVIDEZ C.F. (1988). Influencia de los cambios en el uso del suelo sobre el escurrimiento y la erosión en la cuenca del Río Piraí. Amazonia andina, Bolivia. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 241 p.

CRUZ C. (1987). Balance hídrico superficial de la Cuenca del Río Itenez, Amazonia, Bolivia, Brasil. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 218 p.

ESPINOZA O. (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Beni, Amazonia, Bolivia. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 181 p.

FERNANDEZ-JAUREGUI C.A., ROCHE M.A., ALIAGA A. y PEÑA J. (1987). Los recursos hídricos en Bolivia. Publ. PHICAB, 20 p.

FRANZEL O. (1979). The Water balance of the tropical rain forest of Amazonia and the effects of human impact. Applied Sciences: 88-117.

FRIAS R. (1989). Balance hídrico superficial de la cuenca de los ríos Bermejo y Grande de Tarija, Río de La Plata, Bolivia. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 263 p.

GARCIA R. (1989). Balance hídrico superficial de la cuenca del río Mamoré, Amazonia, Bolivia. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 110 p.

HERBAS C. D. (1987). Climatología de la cuenca andina y amazónica del Río Grande, Bolivia. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 240 p.

JOHNSON A.M. (1976). The climate of Peru, Bolivia and Ecuador. In World survey of Climatology, vol. 12, H. E. Landsberg (ed.), Elsevier, Amsterdam: 147-218.

JORDAN D.F. y JEUVELDOP J. (1981). The water budget of the amazonian rain forest. Acta Amazónica, 11, 1: 878-92.

LEROUX M. (1987). L'anticyclone mobile polaire, relais des échanges méridiens: son importance climatique. Géodynamique 2 (2): 161-167

LOZADA G.A. (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Lago Poopó y los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. Publ. PHICAB. Tesis UMSA, La Paz, 203 p.

MOLION L.C.B. (1991). Climate variability and its effects on amazonian hydrology. In Water Management of the Amazon basin, UNESCO-ROSTLAC, Montevideo: 261-274.

- ROCHE M.A. (1986). Distribuciones espacio-temporales de los parámetros climatológicos sobre Bolivia. Premier Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz, sept." 29-32.
- ROCHE M.A. (1988). CLIMAR2: Logiciel d'exploitation de données pour l'étude des variations climatologiques spatio-temporelles. Publ. PHICAB, La Paz, 102 p.
- ROCHE M.A. y ROCHA N. (1985). Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4.000.000 Publ. PHICAB, 1 hoja offset color.
- ROCHE M.A. (1988). Las aplicaciones del Proyecto PHICAB al desarrollo de Bolivia. Proc. Segundo Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia, La Paz: 77-88.
- ROCHE M.A., ALIAGA A., CAMPOS J., PEÑA J., CORTES J., ROCHA N. (1990). Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes boliviennes. In Hydrology in Montaneous Regions, H. Lang y A. Musy (eds), IAHS, publ. 193: 381-388.
- ROCHE M.A., BOURGES J., CORTES J., MATTOS R. (1991). Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca. In El lago Titicaca, Ed. Dejoux C. & Iltis A. HISBOL-ORSTOM, La Paz: 83-104. In english, In The Lake Titicaca, Kluwer Academic Publishers.
- RONCHAIL J. (1985). Situations météorologiques et variations climatologiques en Bolivie. Publ. PHICAB, 60 p.
- RONCHAIL J. (1986). Situations atmosphériques et précipitations comparés sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie. Publ. PHICAB, La Paz, 43 p.
- RONCHAIL J. (1989). Advections polaires en Bolivie: mise en évidence des effets climatiques. Hydrol. Cont., 4, 1" 49-56.
- SALATI E. y MARQUES J. (1984D). Climatology of the Amazon Region. In The Amazon, Sioli H. (ed.), W. Junk, Dordrecht: 85-126.
- UNESCO (1982). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Estudios e informes en hidrología, Unesco-Rostlac, Montevideo, 130 p.
- VILLA NOVA N.A., SALATI E., MATSUI, E. (1976). Estimativa da evapotranspiração na bacia amazônica. Acta Amazônica, 6: 215-288.

FUNCIONAMIENTO DE LOS SURAZOS EN AMERICA DEL SUR Y EFECTOS CLIMATICOS EN BOLIVIA: ALGUNOS RESULTADOS

Josyane RONCHAIL

*GHSS, Université Paris 7, Place Jussieu, 75005 PARIS, France
LMD/CNRS, Ecole Polytechnique, 91128 PALAISEAU, France*

INTRODUCCION

En Sudamérica el aire frío que llega desde el sur del continente provoca vientos fuertes (el "sur"), importantes descensos de temperatura en las latitudes subtropicales y tropicales, y está precedido por frentes fríos que generan nebulosidad y de vez en cuando lluvias. Son particularmente importantes en invierno cuando el sur del continente está frío.

El estudio de las advecciones frías en Sudamérica, con un enfoque sobre Bolivia, tiene dos objetivos:

- comprender cómo se producen los intercambios meridianos de calor entre altas y bajas latitudes, puede permitir el mejoramiento de los modelos meteorológicos y climáticos;
- mejorar el conocimiento del clima de Bolivia que, por su latitud y por la presencia de los Andes, queda bajo la influencia del aire tropical tal como del aire de latitud más alta;
- considerar las posibilidades de previsión a corto y a largo plazo de las advecciones frías que pueden dañar la vida del hombre y sus actividades.

Estos estudios son posibles gracias a los datos del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología y Hidrología), de la AASANA (Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares a la Navegación Aérea) y del CEPMMT (Centro Europeo para la Previsión Meteorológica a Medio Plazo). Se realizan gracias a la ayuda del PHICAB (Proyecto Hidrológico de la Cuenca Amazónica Boliviana), del IFEA (Instituto Francés de Estudios Andinos) y del LMD (Laboratorio de Meteorología Dinámica del Centro Nacional de la Investigación Científica de Francia).

LAS ADVECCIONES FRIAS EN SUDAMERICA TROPICAL Y SUBTROPICAL

El CEPMMT proporciona, para el mundo entero y sobre una red de 2,5° de latitud y 2,5° de longitud, datos de temperatura, presión y viento zonal y meridiano, para los niveles standard de la atmósfera (1000, 850, 700, 500, 300, 200 y 100 mb), a 12UTC. Por eso permiten un estudio de las advecciones frías en altura y a nivel de toda Sud América.

La variabilidad de los parámetros climáticos a nivel del suelo en el trópico, al Este de los Andes.

La anomalía negativa que se encuentra en el campo térmico promedio invernal al Este de los Andes, desde los 40° S hasta 18°S (Fig. 1), muestra la frecuencia importante de las temperaturas bajas a nivel del suelo. Esta ligada:

- a una variación muy fuerte de las temperaturas en aproximadamente 22,5°S, 60°W, como lo muestra el campo de desviación standard de la temperatura (Fig. 2) y la evolución durante 4 años (85-88) de la temperatura diurna invernal (Fig. 3).

- a la importante variabilidad de la presión y del viento meridiano que se pone de sur en vez de norte cuando se produce una advección fría (Fig. 4).

Estas variabilidades se notan hasta 700 mb de la atmósfera y como son todas muy marcadas alrededor de 22,5°S, 60°W, este punto será utilizado en la parte 2.2.

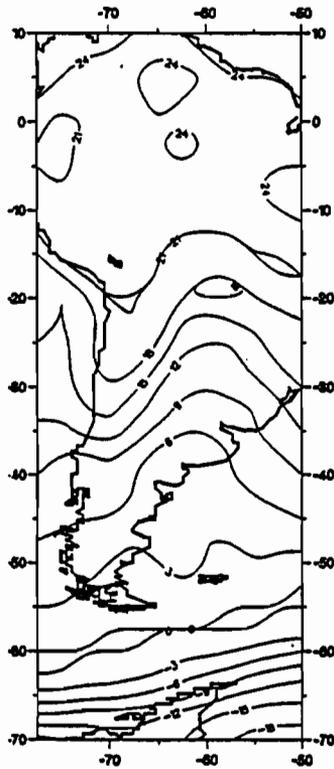


Fig. 1: Temperatura promedio de los inviernos 1985-1988 a 100 mb.

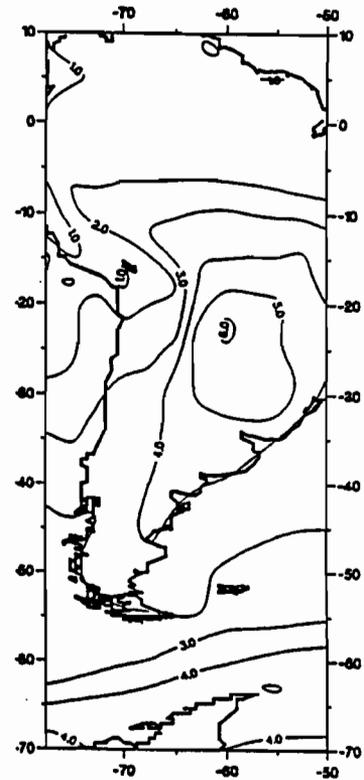


Fig. 2: Variabilidad de la temperatura diaria a 100 mb. Isolíneas de desviación standard. Inviernos 1985-1988.

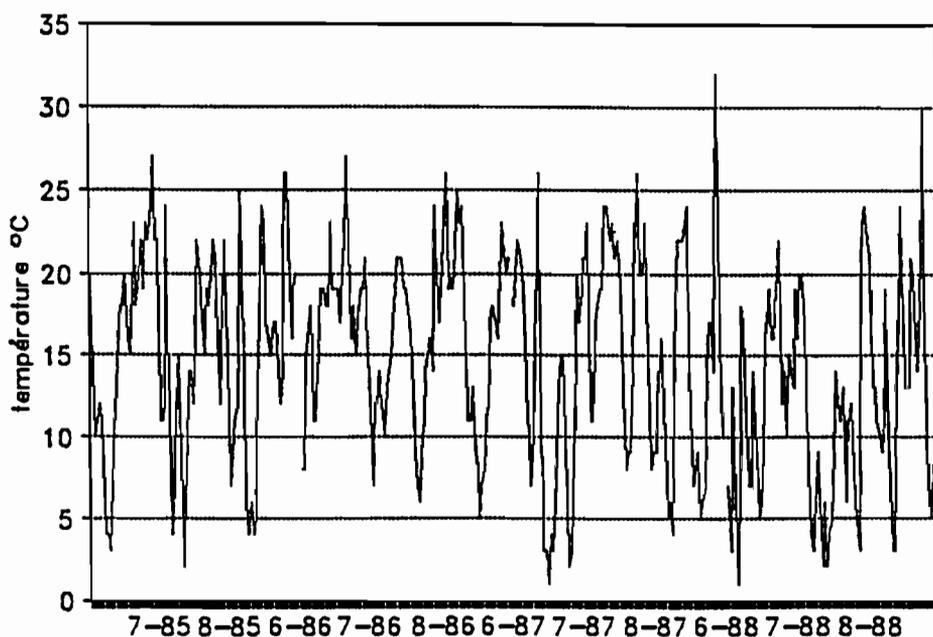


Fig. 3: Temperatura diaria a 1000 mb, a 22,5°S, 60°W durante los inviernos 1985-1988.

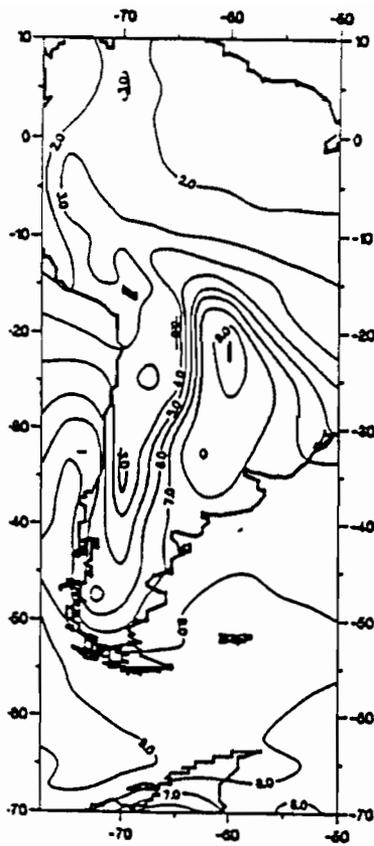


Fig. 4: Variabilidad del viento meridiano a 850 mb. Isólnes de desviación standard del viento. Inviernos 1985-1988.

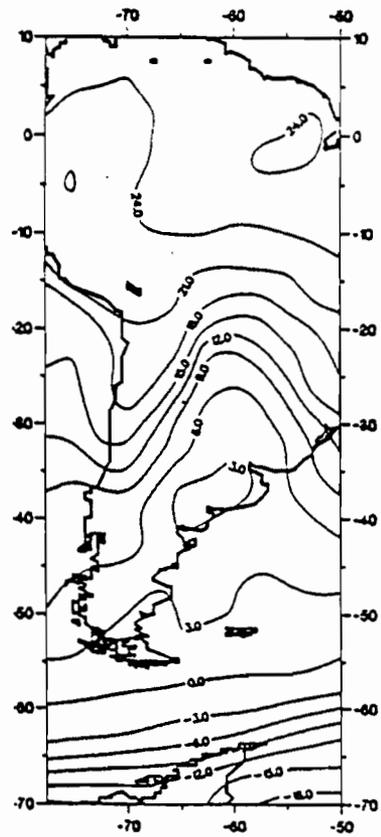


Fig. 5: Temperatura "composita" a 1000 mb el día en que se produce un descenso de al menos 7°C a 22,5°S, 60°W.

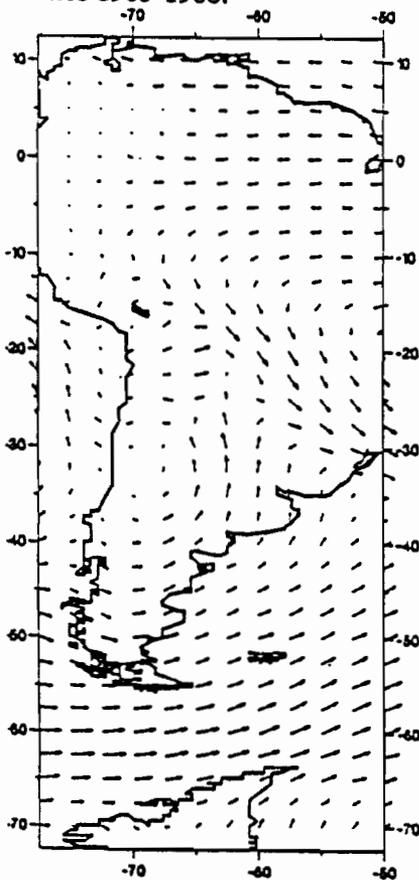


Fig. 6: Viento "composito" a 850 mb, el día antes de un descenso de al menos 7°C a 22,5°S, 60°W. El vector más largo indica una velocidad de 12 m/s.

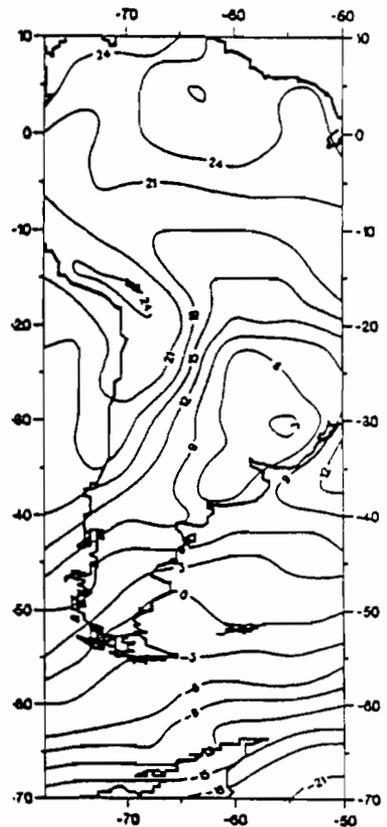


Fig. 7: Temperatura a 1000 mb el 18 de junio 1987.

Análisis "composito" al nivel del suelo y en altura de las advecciones frías de 4 inviernos (85-88)

Método

El estudio de la organización en el espacio sudamericano y en el tiempo de las advecciones frías, se realiza por medio de un análisis "composito" que permite reconstituir un evento frío a partir de un conjunto de 27 hechos observados durante los inviernos de 1985 a 1988.

Este análisis toma en cuenta los datos diarios a 12UTC de temperatura, viento meridiano y zonal y geopotencial a todos los niveles de la atmósfera, durante los 10 días que rodean una advección fría (día cero). Los acontecimientos fríos se reconocen por el descenso de por lo menos 7°C, de un día al otro, en la temperatura del nivel 1000mb a 22,5°S, 60°W.

Análisis al nivel del suelo

La comparación del mapa de la temperatura "composita" al nivel del suelo el día cero (Fig. 5) y del mapa de la temperatura media (Fig. 1) muestra un ascenso hacia el norte de las isotermas que es muy importante en las latitudes subtropicales; así, la isoterma 3°C se desplaza desde 50°S hasta 35°S y la isoterma 9°C, de 35°S a 25,5°S. Hacia el Ecuador el enfriamiento se atenúa. Al mismo tiempo, el viento proviene del sur (Fig. 6) y el geopotencial aumenta.

Durante los días que siguen al día cero, el fenómeno se propaga hacia el norte y dura más o menos 4 días antes de desaparecer. En promedio la advección fría sigue notándose hasta 15°S pero, en algunos casos, llega hasta latitudes más bajas; en junio de 1987 por ejemplo, una advección fría llega a 10°S y produce un descenso de temperatura de 5°C (Fig. 7). En la figura 7 se nota también la importancia del efecto de los Andes, que canalizan el flujo desde la Plata hasta el Noroeste de Brasil.

Análisis en altura

El enfriamiento se observa en las capas bajas de la atmósfera hasta 500mb. Pero con la altura se vuelve menos importante: la isoterma -21°C alrededor de 40° S se desplaza solamente 5° de latitud en 4 días. En cambio, a 200mb (Fig. 8), se nota un calentamiento de la atmósfera que puede ser atribuido a la subsidencia del aire encima del aire frío (de Oliveira y Nobre, 1986). La relación entre aire frío, en el suelo, y aire caliente a 200mb, se ve también en un mapa de correlación (Fig. 9): una amplia zona de correlaciones negativas, entre las temperaturas de los dos niveles, cubre la región estudiada.

El calentamiento en altura está vinculado a la existencia de una ondulación ciclónica del jet de Oeste y a un descenso de la presión (Fig. 10). Esto corresponde a las descripciones de Leroux (1987) y es coherente con la existencia concomitante de una circulación de oeste ondulante sobre el Pacífico (Fortune y Kousky, 1983). Además, una correlación negativa entre el viento al suelo (850mb) y el viento en altura (200mb) deja pensar que la advección fría desde el suelo activa una célula de circulación meridiana con:

- viento del sur al suelo,
- ascendencia al nivel del frente frío,
- viento de norte en altura
- subsidencia sobre el aire frío.

Estos primeros resultados merecen ser ampliados para comprender el efecto de las advecciones frías sobre la circulación general de la atmósfera.

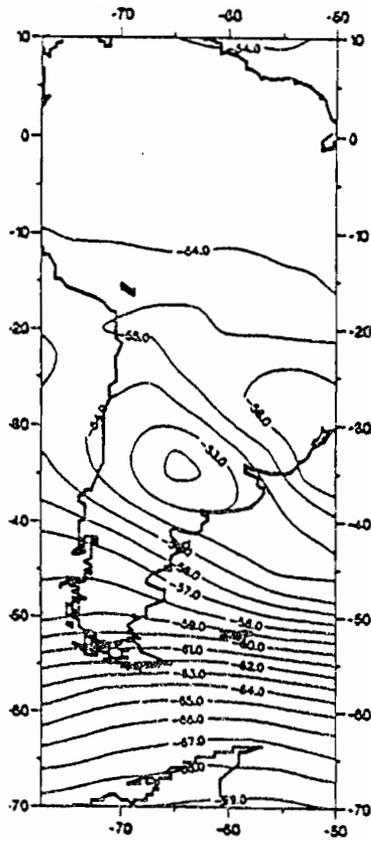


Fig. 8: Temperatura "composita" a 200 mb el día antes de un descenso de al menos 7°C de la temperatura a 1000 mb, a 22,5°S, 60°W.

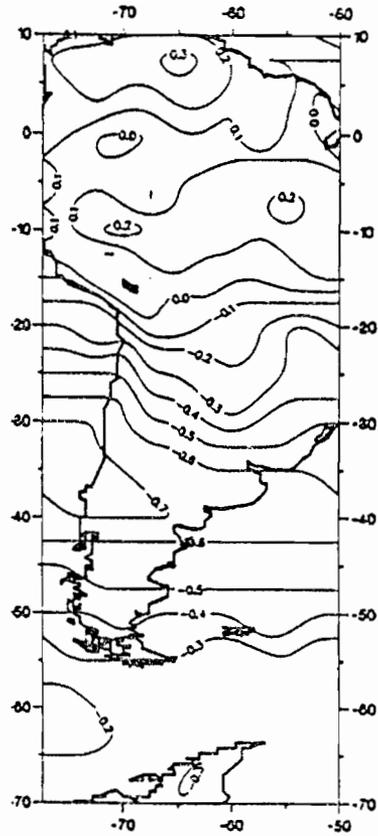


Fig. 9: Correlación entre la temperatura a 700 mb y la temperatura a 200 mb. Inviernos 1985-1988.

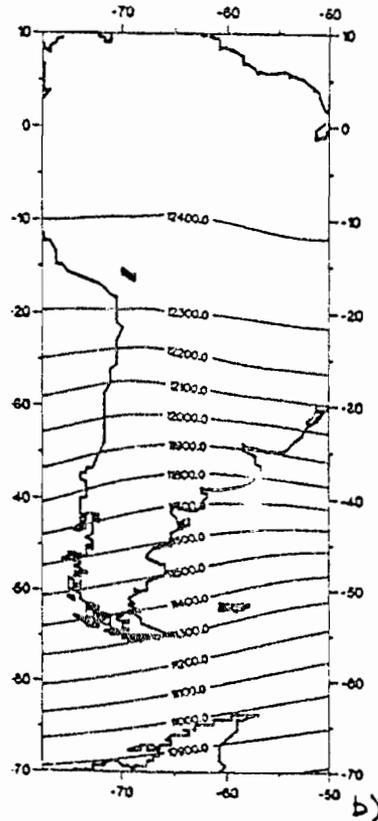
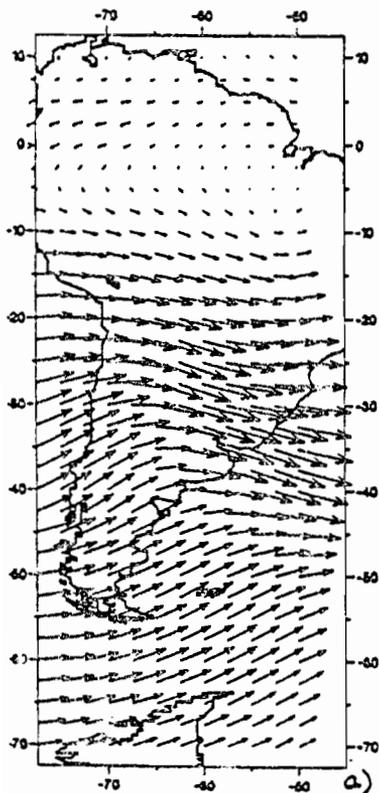


Fig. 10: a) Viento (el vector más largo indica una velocidad de 42 m/s) y b) Geopotencial (en metros "compositos" a 200 mb, el día antes de un descenso de al menos 7°C de la temperatura en el suelo a 22,5°S, 60°W.

LAS ADVECCIONES FRIAS EN BOLIVIA

Bolivia queda muy cerca del punto de máxima variabilidad de los parámetros climáticos estudiados en la parte 2. Por esta razón es interesante considerar cuáles son los efectos de las advecciones frías en este país.

El estudio de la organización en el espacio boliviano, y en el tiempo, de los efectos climáticos de las advecciones frías se realiza por medio del análisis "composito" de 67 eventos que se produjeron durante los inviernos de 1973 a 1984. Este análisis toma en cuenta los datos cotidianos de temperaturas máximas y mínimas y de precipitaciones de seis estaciones durante la semana que sigue una advección fría. Los acontecimientos fríos se reconocen por el descenso de por lo menos 10°, de un día al otro, de la temperatura máxima de Tarija (Ronchail, 1989).

Efectos climáticos en el llano boliviano

Es en el llano y en invierno, cuando el aire frío se puede regenerar sobre el sur del continente, que los surazos producen más efecto con un gradiente desde sur hacia norte, y con un día de atraso entre el sur y el norte del país. En promedio, los surazos se producen 6 a 8 veces cada invierno.

Las temperaturas máximas

El descenso de temperatura, en cuanto a las máximas (Fig. 11) es notable, de corta duración e intensa; el efecto del aire frío se añade al de la nebulosidad ligada al frente frío anterior. La temperatura diurna puede descender más de 20° C de un día al otro en Santa Cruz.

Las temperaturas mínimas

Las mínimas disminuyen de manera progresiva y más modestamente, pues la débil radiación nocturna, a causa de la nebulosidad, compensa probablemente en gran parte el efecto de la advección fría. Pero es en el momento de advecciones frías que se registran los récords de frío en la parte baja del país.

El análisis de la frecuencia de las temperaturas nocturnas indica que en promedio hiela 5 días cada invierno en Yacuiba, en cambio, eso nunca sucedió en Santa Cruz o Trinidad (Fig. 12a). Pero en estas ciudades los records están muy cerca de cero grados: 1,8°C en Santa Cruz, 2°C en Trinidad. Estas temperaturas, entre 0 y 5°C, son muy poco frecuentes en el llano central (Fig. 12b), pero en ciertos veranos, como en julio del 1975, las temperaturas permanecieron bajo 5°C durante 3 días.

En esa época se helaron gran parte de los cafetales del sur de Brasil (Fukui, 1979) y es probable que en Bolivia también los daños causados a las personas, los cultivos invernales y las plantas arbustivas hayan sido importantes.

Las lluvias

Cuando sucede una advección fría, el aire frío y pesado levanta el aire tropical más caliente y liviano, ocasionando un frente frío. Si el aire es húmedo puede llover. Por este motivo, en Santa Cruz, las advecciones frías provocan una caída de lluvia de un promedio de 8 milímetros en el 50% de los casos (Fig. 11). En Cobija se registran, con un día de retraso, más de 3 milímetros en el 25% de los casos.

Las lluvias que se registran en la estación normalmente seca en el Trópico alcanzan 14% del total anual en Santa Cruz y 8% en Trinidad. Pueden ser favorables a los cultivos invernales pero también pueden provocar daños tal como la erosión de las tierras sin cobertura vegetal.

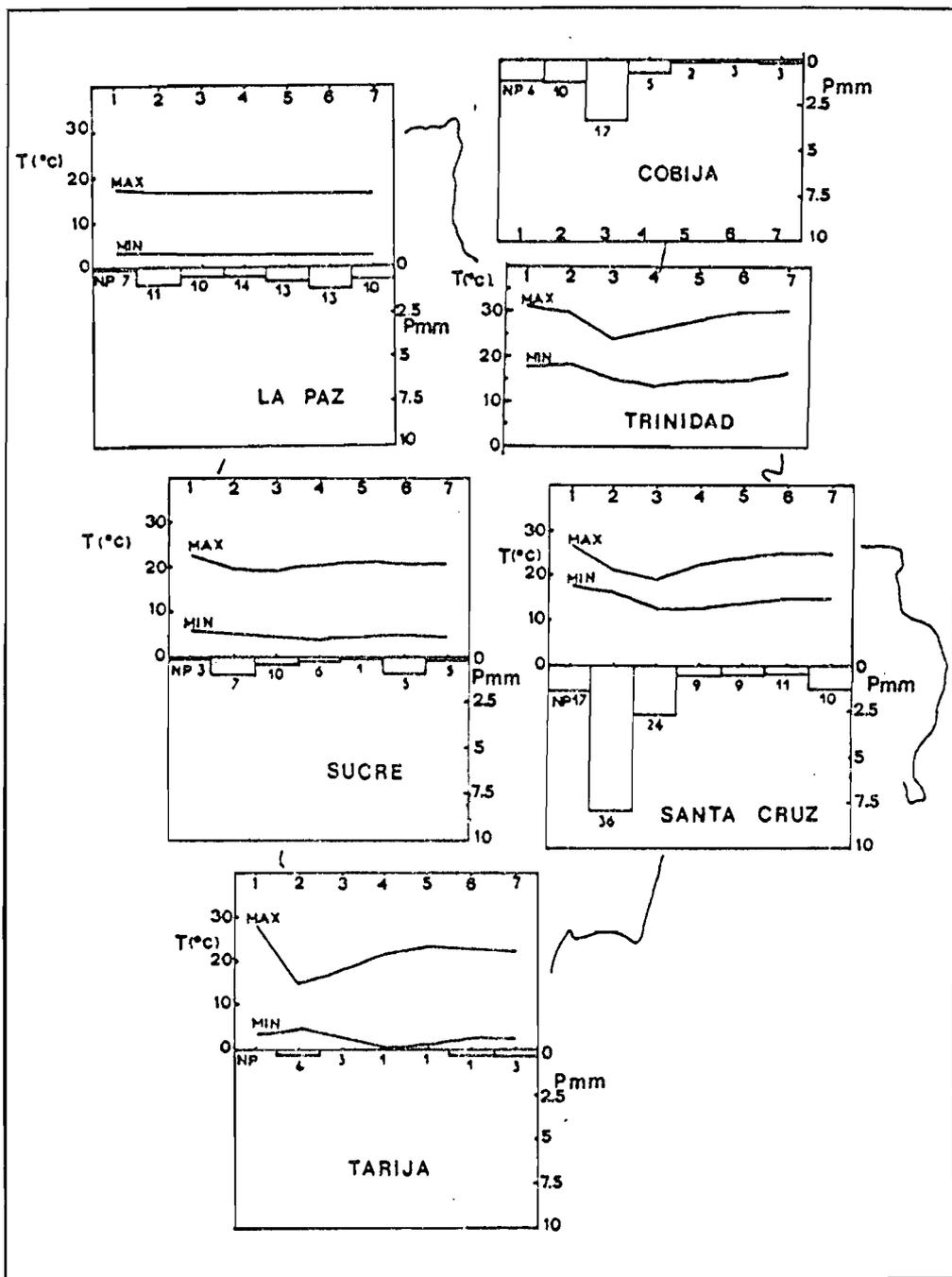
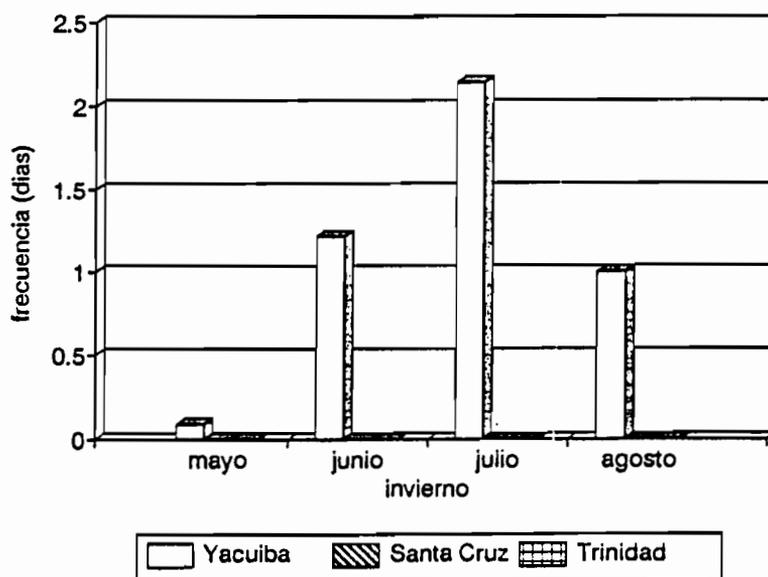


Fig. 11: Analisis "composito" de los acontecimientos frios invernales: 67 casos en el periodo 1973-1984. Temperaturas maximas y minimas (°C) y precipitaciones (mm) cotidianas de seis días que siguen a un descenso de al menos 10°C en Tarija. NP: numero de días de precipitaciones. Reprinted from Ronchail, 1989.

TEMPERATURAS NEGATIVAS



$0 < T < 5 \text{ grad.}$

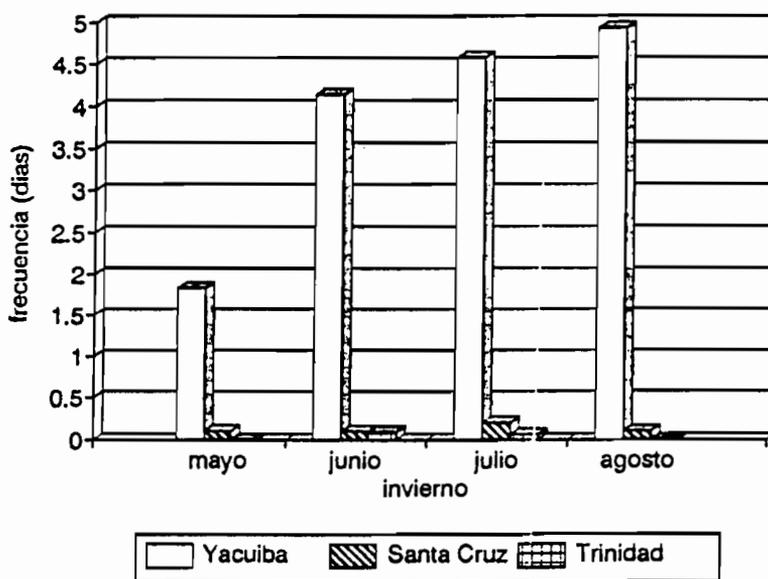


Fig. 12: Frecuencia de las temperaturas a) negativas, b) entre 0 y 5°C, en Yacuiba (76-90), Santa Cruz (49-90) y Trinidad (58-90).

Efectos climáticos en los valles y en el Altiplano

En la parte 1 se vió que en promedio las advecciones frías se notan muy poco a 500 mb, es decir más o menos a 5500 metros. Pero las ascendencias ligadas a los frentes fríos pueden alcanzar el Altiplano. Esto se verifica muchas veces: hay nebulosidad, por lo menos en La Paz, cuando hay un surazo en el llano y por ejemplo durante el último invierno de 1992, en julio y agosto, las fuertes nevadas fueron precedidas por surazos en el llano.

Pero no se registran precipitaciones en La Paz cada vez que hay un surazo. En promedio, en los inviernos de los años 73 a 84 (Fig. 11) uno de 6 surazos dan precipitaciones muy débiles en La Paz (menos de 1 milímetro en promedio) y no tienen

efecto sobre las temperaturas (Fig.11), aunque en algunos casos una importante nebulosidad puede reducir las temperaturas diurnas. Este asunto de la relación entre surazos y nevadas en el Altiplano tiene que ser investigado más sistemáticamente.

En Tarija, estación ubicada en un valle abierto al Sureste, el aire frío puede penetrar y generar descensos fuertes en la temperatura, tal como los del llano, (Fig. 11), pero no producen lluvias probablemente porque el aire es demasiado seco en este periodo del año.

Variabilidad temporal de las advecciones frías y sus efectos sobre las lluvias

Las temperaturas y las lluvias invernales varían de un año a otro en Bolivia y una hipótesis es que esta variabilidad está ligada a la frecuencia y a la importancia de los frentes fríos. Pocos estudios fueron realizados sobre este tema. Pero ya se sabe que correlación entre la frecuencia de las advecciones frías y las lluvias en Santa Cruz no es significativa en el periodo 49-89. Quizás habría que tomar en cuenta la importancia de los surazos pero todavía es difícil evaluar este parámetro.

Otro tema que quedaría por investigar es la relación entre el ENSO, las advecciones frías y las lluvias. Ya se sabe que para el sur de Brasil y el norte de Argentina (Aceituno, 1988) hay una relación entre una fase negativa del ENSO y lluvias importantes. Esto se debería a la aceleración del Jet de Oeste subtropical (Aceituno, 1988) que acentúa las ascendencias a nivel de los frentes fríos y bloquea su progresión hacia el norte. Una hipótesis es que en el llano se da el mismo caso que en los lugares mencionados.

En Santa Cruz existe una significativa relación negativa pero con 10% de error entre la frecuencia de las advecciones frías en agosto y el índice de oscilación austral (IOA) del otoño (marzo, abril, mayo). Esto quiere decir que cuando el índice es bajo (alto) llueve más (menos) en Santa Cruz. También aparece una relación del mismo tipo entre las lluvias de agosto en Santa Cruz y el IOA. del otoño : llueve más (menos) en Santa Cruz cuando el IOA es débil (fuerte) en otoño, (Fig. 13).

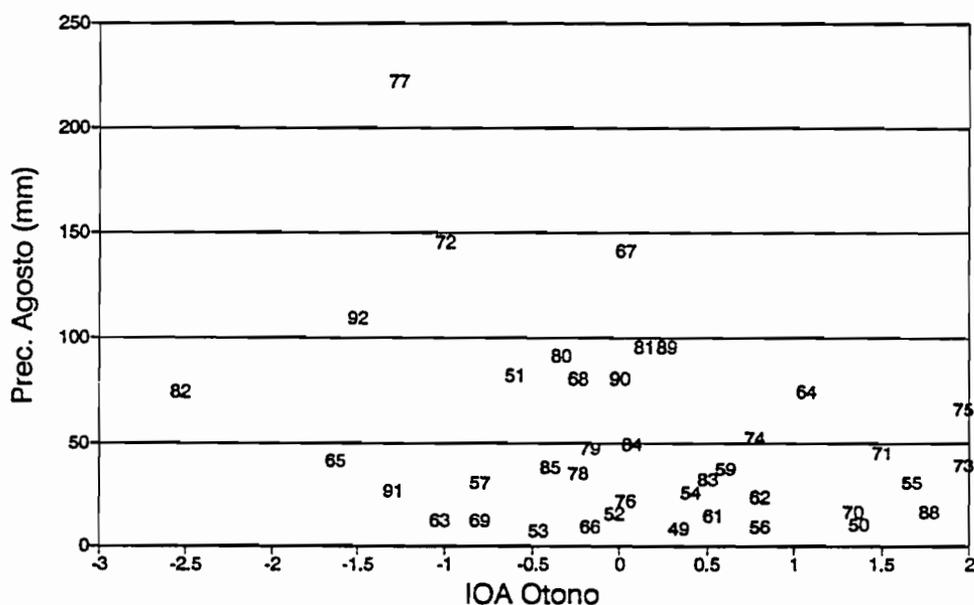


Fig. 13: Relación entre las lluvias de agosto en Santa Cruz y el índice de Oscilación Austral del otoño

Durante el invierno de 1992, las temperaturas estuvieron por debajo de los promedios y las lluvias en exceso en el llano central. Esto puede ser atribuido a una actividad intensa de los frentes fríos, ligada al Niño del verano pasado. Sin embargo, la figura 13 muestra que la cantidad de lluvia que cae cuando el índice es bajo varía mucho, desde menos de 50mm (65, 57), hasta más de 200mm (77) y que lluvias en exceso pueden ser registradas también cuando el índice es alto.

Esto confirma que las relaciones entre ENSO, advecciones frías y lluvias, aunque significativas, son muy débiles y limitadas al mes de agosto. Estos resultados pueden indicar que :

- hay otros fenómenos que explican las lluvias invernales en esta parte del llano,
- los eventos ENSO no se parecen en cada ocasión. Esto podría ser porque la posición del Jet Subtropical de Oeste difiere cada vez y bloquea los frentes en latitudes distintas de un Niño a otro.

CONCLUSION

Este trabajo, en parte teórico, en parte aplicado con un objetivo de previsión del tiempo a corto y medio plazo en Bolivia, debe ser ampliado. Quedan en suspenso muchas preguntas :

- ¿Por qué ciertas advecciones dan lluvias y/o temperaturas muy bajas en la parte oriental de Bolivia y otras no? ¿Existen diversos tipos de advección fría? ¿Quizás con trayectorias distintas? ¿Cuáles son las posibilidades de previsión a corto plazo? ¿Cuáles son los modos de prevención de sus efectos?
- ¿Cuáles son las condiciones para que existan nevadas en la parte altiplánica? ¿Cual es la importancia de estas nevadas para el hombre?
- ¿Cuáles son las relaciones exactas entre el ENSO, las advecciones frías y los parámetros climáticos? ¿Cuáles son las posibilidades de previsión a mediano plazo? ¿Cuáles serían las alternativas para los agricultores frente a la noticia de condiciones desfavorables?

Para responder a todas estas preguntas se necesita el trabajo continuo de todo un equipo que se espera pueda darse en el futuro. Es importante para el desarrollo de la parte oriental del país, que es la más afectada por las advecciones frías.

REFERENCIAS

AASANA (Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares a la Navegación Aérea): mapas sinópticos diarios (1973-1990) y datos de precipitaciones y temperaturas (1943-1992).

ACEITUNO, P., 1988: On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 1: Surface climate. Mon. Wae. Rev., 116, 505-524.

ACEITUNO, P., 1988: On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 2: Upper-air circulation.. Mon. Wea. Rev.

CEPMMT (Centro Europeo para la Prevision Meteorologica a Medio Plazo): análisis, 1985-1988.

FORTUNE, M.A. y V.E. KOUSKY, 1983: Synoptic precursors of three brazilians freezes in the Pacific Ocean and South America. INPE-2730-PRE/312, Instituto de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos, Brasil.

FUKUI, H., 1979: Climatic variability and agriculture in tropical moist regions, World Climatic Conference, Geneve, 426-474.

LEROUX, M. , 1987: L'anticyclone mobile, relais des échanges méridiens: son importance climatique.

Geodynamique 2 rempl. les cahiers ORSTOM, Paris, Seminaire Paleolacs-Paleoclimats, 91-174.

De OLIVEIRA, A. S. y C.A. NOBRE, 1986: Interactions between frontal systems in South America and tropical convection over the Amazon. Second International Conferences on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 1-5 dec. 1986, Wellington, New Zeland. Amer. Meteor. Soc., Boston, Mass: 56-59..

RONCHAIL, J., 1989: Advecciones polares en Bolivia: caracterización de los efectos climáticos. Bull. Inst. Fr. Et. And., XVIII, 65-73.

RONCHAIL, J., 1989: Climatological winter effects of southern advections in Bolivia and North-West Brasil (73-84). Third International Conferences on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 13-17 nov. 1989, Buenos Aires,. Amer. Meteo. Soc., Boston, Mass: 180-182

SENAMHI (Servicio nacional de Meteorología y Hidrología) : Boletín Agrometeorológico, n°1-37, Boletín climatológico, n°1-37 y datos de temperaturas y precipitaciones (1943-1992).

BALANCE HIDRICO DE BOLIVIA

Angel ALIAGA R.

IHH-UMSA, CP 8610, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

Objetivo

El objetivo principal del Balance Hídrico es realizar una evaluación cuantitativa espacial y temporal a nivel medio anual de los recursos hídricos del territorio nacional, lo que permite conocer y caracterizar los componentes del ciclo hidrológico para la cuenca objeto del estudio. Los resultados tienden a sentar las bases para la formulación de un diagnóstico sobre la disponibilidad potencial del recurso hídrico, muy necesario para la planificación de su aprovechamiento, control y conservación; finalmente como corolario, las necesidades de calidad y cantidad de información permiten evaluar las bondades y/o deficiencias de la red de observación hidrometeorológica y del sistema de información en el área de los recursos hídricos.

Antecedentes

El Balance Hídrico Superficial de Bolivia fué realizado bajo el patrocinio del Programa Hidrológico INTERNACIONAL (PHI/UNESCO) y del Proyecto Hidrológico y Climatológico de Bolivia (PHICAB), Programa establecido mediante un Convenio de Cooperación Técnico-Científica entre el Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), el Instituto Francés de Investigaciones Científicas para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) establecido el año 1984.

Metodología

Para lograr una necesaria homogeneidad a escala del Continente, el grupo de trabajo asumió principalmente las recomendaciones de UNESCO/ROSTLAC formuladas en la "Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur" [14], publicada en 1982, así como también las recomendaciones de las diferentes reuniones técnicas convocadas por UNESCO a este fin.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LA CUENCA

Ambito Geográfico

Bolivia ubicada en la zona tropical de Sud América entre los 9°30'-22°55' latitud Sur y 69°40'-57°20' longitud Oeste, cuenta con una superficie de 1098581 Km² distribuída en una compleja morfología. La cobertura vegetal es muy variada de región a región, así como su distribución de relieve topográfico, que puede apreciarse en la figura 2, donde se observa que el 60% se encuentra debajo de los 500 m.s.n.m., 15 % entre los 500 y 2500 m.s.n.m. y el 25% por encima de los 2500 m.s.n.m., aspecto que inicialmente da lugar a inferir la existencia de tres regiones de altura, clima y vegetación bien caracterizadas: Altiplano, Valles y Llanos.

Se distinguen siete unidades morfo-estructurales: Faja Occidental, Altiplano, Cordillera Oriental, Faja Sub-Andina, Planicies Chaco-Benianas, Escudo Brasileiro y las Sierras

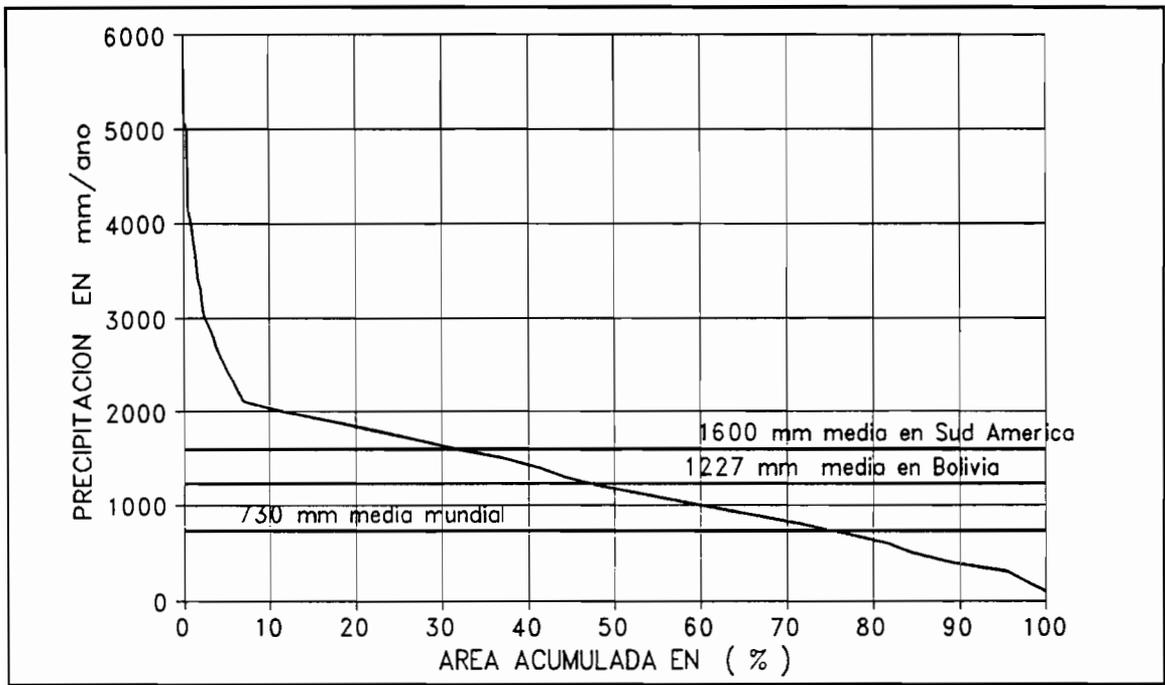


Figura 1. Precipitación anual media en Bolivia con relación al área acumulada

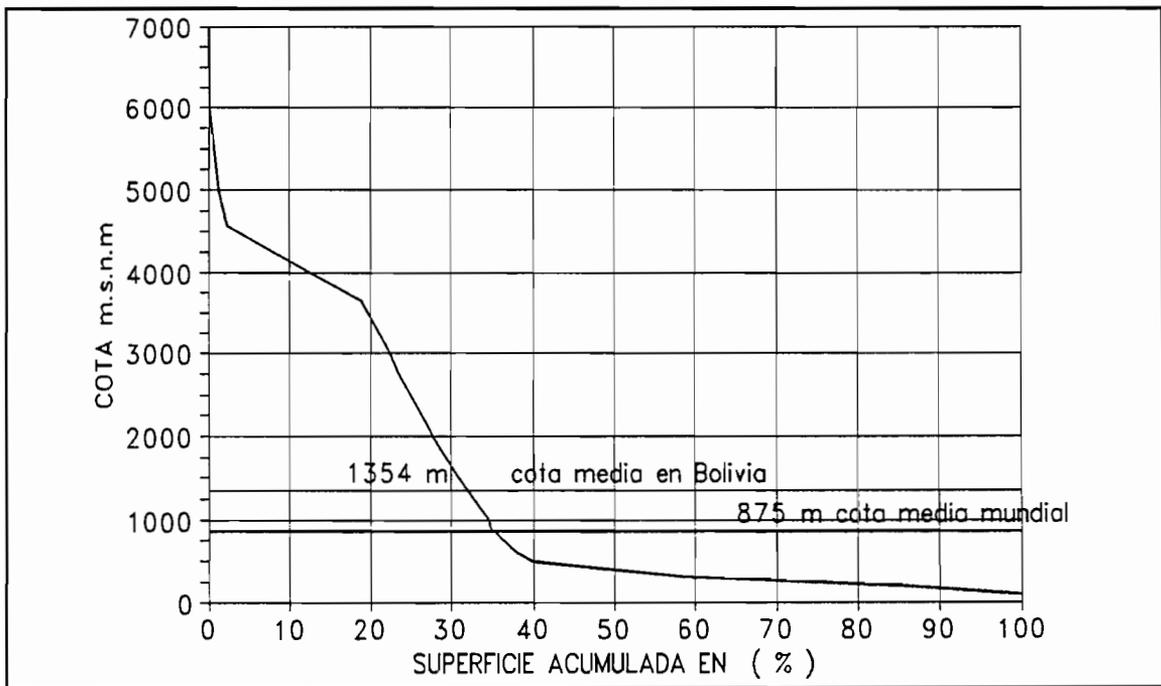


Figura 2. Curva Hipsometrica de Bolivia

Chiquitanas.

Sobresale también la presencia de la Cordillera de los Andes, con sus cimas más altas que bordean los 7000 metros de altura. De acuerdo al inventario nivológico nacional [4] la cobertura de nieves es del orden del 1% del territorio nacional.

Otro de los factores fisiográficos importantes constituyen los lagos y salares del Altiplano.

Estos factores geográficos asociados a otros de orden meteorológico contribuyen a la caracterización climática de las diferentes regiones.

Entre los principales factores meteorológicos se tienen:

- La oscilación de la Zona Inter Tropical de Convergencia (ZITC) y los anticiclones del Pacífico y el Atlántico.
- La incursión de frentes polares desde la frontera argentino-paraguaya.
- El rol orográfico de la Cordillera sobre el movimiento de las masas de aire, principalmente sobre las provenientes de la Amazonía.
- La ubicación del territorio nacional en la zona tropical permite una interacción entre las masas de aire tropical y polar.
- No debe dejar de tomarse en cuenta el efecto termo-regulador y de reciclaje de humedad del Lago Titicaca y el reciclaje de humedad de las llanuras inundables de la Amazonía.

Cuencas Hidrográficas

El sistema hidrográfico de Bolivia comprende tres grandes cuencas: la cuenca Amazónica que cubre el 67.7% del territorio nacional, la cuenca endorréica del Altiplano que cubre el 13.7% y la cuenca del Río de La Plata que abarca 18.6% del territorio nacional. Desde el punto de vista político la tres cuencas son internacionales, ubicándose principalmente en la cabecera de cuenca, excepción hecha de la cuenca del Altiplano.

Esta regionalización hidráulica natural se asumió para la elaboración del Balance por subcuencas siendo ellas:

Cuenca Amazónica:

- Cuenca del Río Madre de Dios hasta su confluencia con el Río Beni.
- Cuenca del Río Beni hasta el Angosto del Bala.
- Cuenca del Río Mamoré hasta su confluencia con el Río Itenez.
- Cuenca del Río Itenez hasta su confluencia con el Río Mamoré.

Cuenca del Altiplano:

- Cuenca del Lago Titicaca
- Cuenca del Río Desaguadero, Lago Poopó, Salar de Coipasa y Salar de Uyuni.

Cuenca del Río de La Plata

- Cuenca del Río Pilcomayo hasta la estación Misión La Paz.
- Cuenca del Río Bermejo hasta Juntas de San Antonio.

La consolidación de resultados para todo el territorio nacional fue hecha en base a una compilación y compatibilización de los resultados de estos ocho estudios y están presentados en el BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL DE BOLIVIA publicado por ORSTOM y

PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HIDRICO

Cartografía

La cartografía básica utilizada es el Mapa de la República de Bolivia, editado en 1975 por el Instituto Geográfico Militar de Bolivia, Escala 1:1000000 y Mapas Temáticos como: el Mapa Hidrográfico, de Uso de la Tierra y Cobertura Vegetal, Geológico, Ecológico y Mapa Hidrogeológico en su compilación preliminar todos ellos a Escala 1:1000000.

Información Hidrometeorológica

La información hidrometeorológica íntegramente fue obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), institución que centraliza la recopilación de datos hidrometeorológicos y la administración y monitoreo de la red hidrometeorológica del país; asimismo emite boletines climatológicos, anuarios meteorológicos. Es preciso señalar que SENAMHI facilitó el acceso a los archivos primarios y originales, en el marco del Programa PHICAB.

El SENAMHI de la República del Perú cooperó facilitando la información necesaria, correspondiente a la parte alta de la Cuenca del Río Madre de Dios y del Lago Titicaca. La DNAEE y DCRH del Ministerio de Minas de la República del Brasil, facilitaron la información complementaria relativa a las cuencas del Río Madre de Dios, Itenez y complementarios del Norte. EL INCYTH (Argentina) facilitó la información complementaria para la cuenca del Río Pilcomayo.

La información hidrométrica fué complementada y actualizada con trabajos operacionales sobre doce estaciones hidrométricas establecidas por el PHICAB, en las cuales se registra alturas de agua y aforos de caudales con molinete con fines de calibración y verificaciones periódicas de la estación hidrométrica. Además los trabajos de hidrometría del PHICAB permitieron, completar los registros hidrométricos observados en otras estaciones de las cuencas como también su actualización [3], (resultados de este estudio son presentados por Jacques Bourges, en otro artículo de esta publicación)

Período Considerado

En función a una tipificación de los fenómenos, los datos realmente factibles de obtener y la disponibilidad simultánea de información en la Red de Observación considerada y compatibilizadas con las recomendaciones de la Guía [14] el Período elegido para el estudio fue 1968 - 1982.

Ecuación del Balance

El principio de conservación de la masa aplicado a una cuenca permite plantear la ecuación del balance que para el caso de períodos largos (varios años) se simplifica bastante y resulta:

$$P = R + ETR + \mu \quad (3.4.1)$$

donde:

$$\begin{aligned} P &= \text{precipitación en mm ó Km}^3 \\ R &= \text{escorrentía en mm o Km}^3 \\ ETR &= \text{evapotranspiración real en mm o Km}^3 \end{aligned}$$

En el caso de los lagos la ecuación puede tomar la forma:

$$P + AFL = EFL + INF + EVP + ALM + \mu \quad (3.4.2)$$

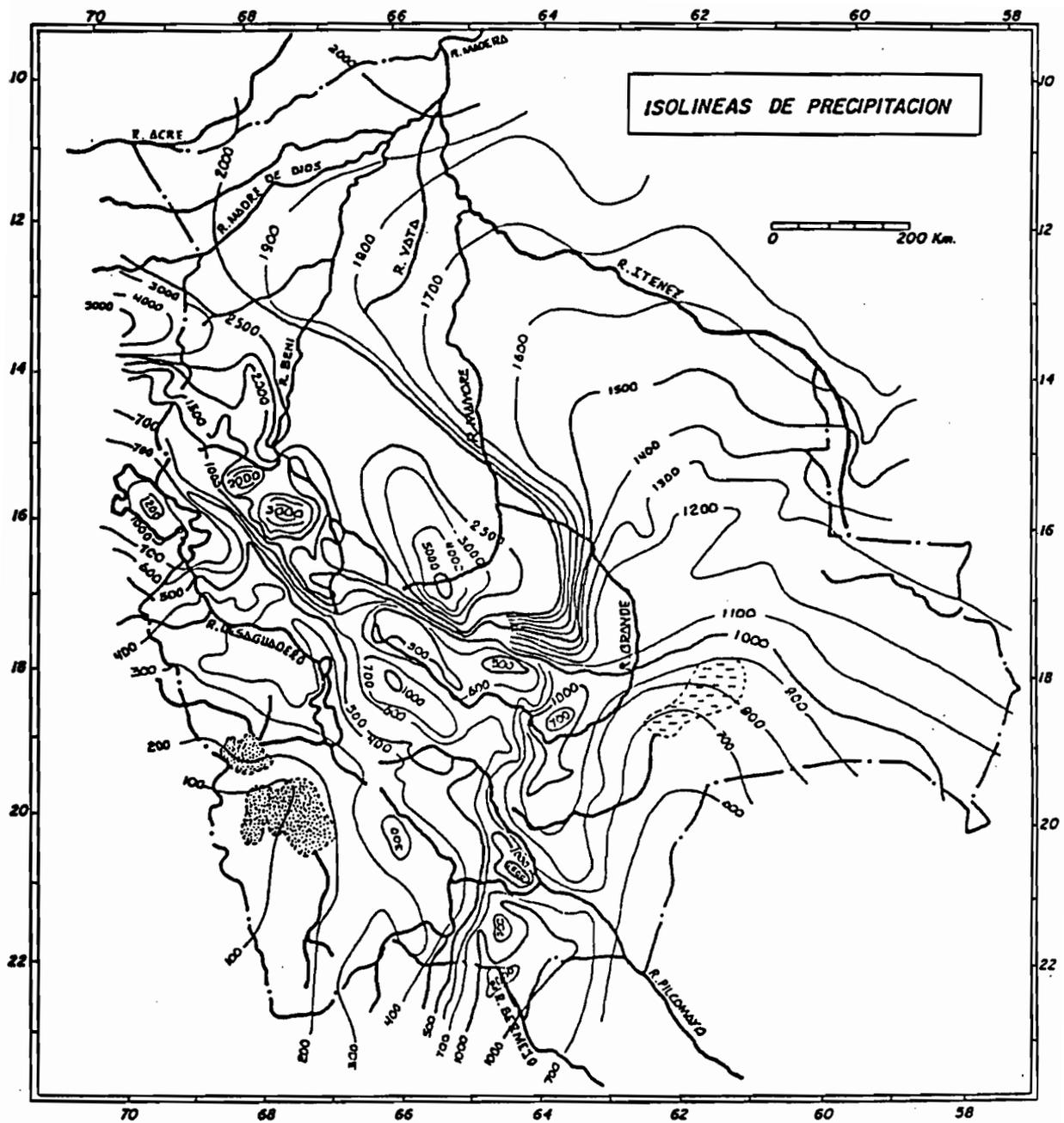


FIG. 3 PRECIPITACION MEDIA ANUAL EN MM/AÑO
(PERIODO 1968-1982)

donde:

P	=	precipitación
AFL	=	caudal afluente al lago
EFL	=	caudal efluente del lago
INF	=	infiltración producida en el lago
EVP	=	evaporación producida desde la superficie del lago
ALM	=	almacenamiento ocurrido en el lago para el periodo de tiempo del balance
μ	=	error de convergencia hacia la ecuación

La metodología desarrollada consiste en obtener para cada parámetro de la ecuación su valor medio sobre la cuenca, resultado que se logra mediante la integración del mapa de isolíneas correspondiente sobre el área de la cuenca.

RESULTADOS E INTERPRETACION

Precipitación

La figura 3 muestra la distribución espacial de la precipitación, donde inicialmente se puede observar una marcada heterogeneidad espacial; ello puede explicarse a partir de la dinámica de las masas de aire activas sobre esta parte del continente y por el efecto orográfico de Los Andes [11]. La figura 1, muestra la relación entre la altura de lluvia que es alcanzada o superada anualmente y el área que abarca para el período del estudio, 1968-1982.

Siendo la precipitación uno de los principales parámetros que caracterizan el clima, el tema es desarrollado con la suficiente amplitud en la disertación de Michel Roche en el tema relativo a la Climatología de Bolivia expuesto en el seminario, objeto de esta publicación.

La cuenca del Río Madre de Dios recibe una precipitación muy alta de 2500 mm a 7000 mm en los flancos andinos y de 1800 a 2500 mm en la llanura con una media de 2380 mm [12].

La cuenca del Río Beni en la parte andina recibe entre 800 y 1000 mm y más de 4000 mm en la parte superior de los valles cálidos (Yungas). Sin embargo los valles que se encuentran al occidente posteriores a las cumbres de la cordillera presentan el efecto de sombra para las masas de aire provenientes de la Amazonía como ocurre con La Paz y Luribay los que reciben entre 350 y 500 mm. La precipitación media en toda la cuenca hasta la confluencia con el Río Madre de Dios es 1755 mm.

La cuenca del Río Mamoré tiene valores extremos de 480 mm en la zona semiárida y 6000 mm al pie de Los Andes localizándose en la región de Chapare y Chipiriri, la precipitación se incrementa en dirección norte (800 a 1900mm) [12].

La cuenca del Río Itenez recibe una precipitación de 900 mm en el Sur, llegando a 1900 mm en el Norte. La precipitación media en la cuenca alta del Río Madera es de 1705 mm.

La Cuenca del Altiplano recibe precipitaciones que varían de 700 mm en el Norte a 200 mm en el Sur teniendo como valores extremos 1200 mm sobre el propio Lago Titicaca y 100 mm al Sud Occidente. El Lago Poopó recibe 400 mm llegando hasta los valores más extremos en el salar de Atacama en Chile (25 mm).

La cuenca del Plata caracterizada por los Ríos Pilcomayo y Bermejo recibe precipitaciones 2000 mm en la cuenca del Río Bermejo llegando a valores extremos de 300 mm en la cuenca alta del Río Pilcomayo.

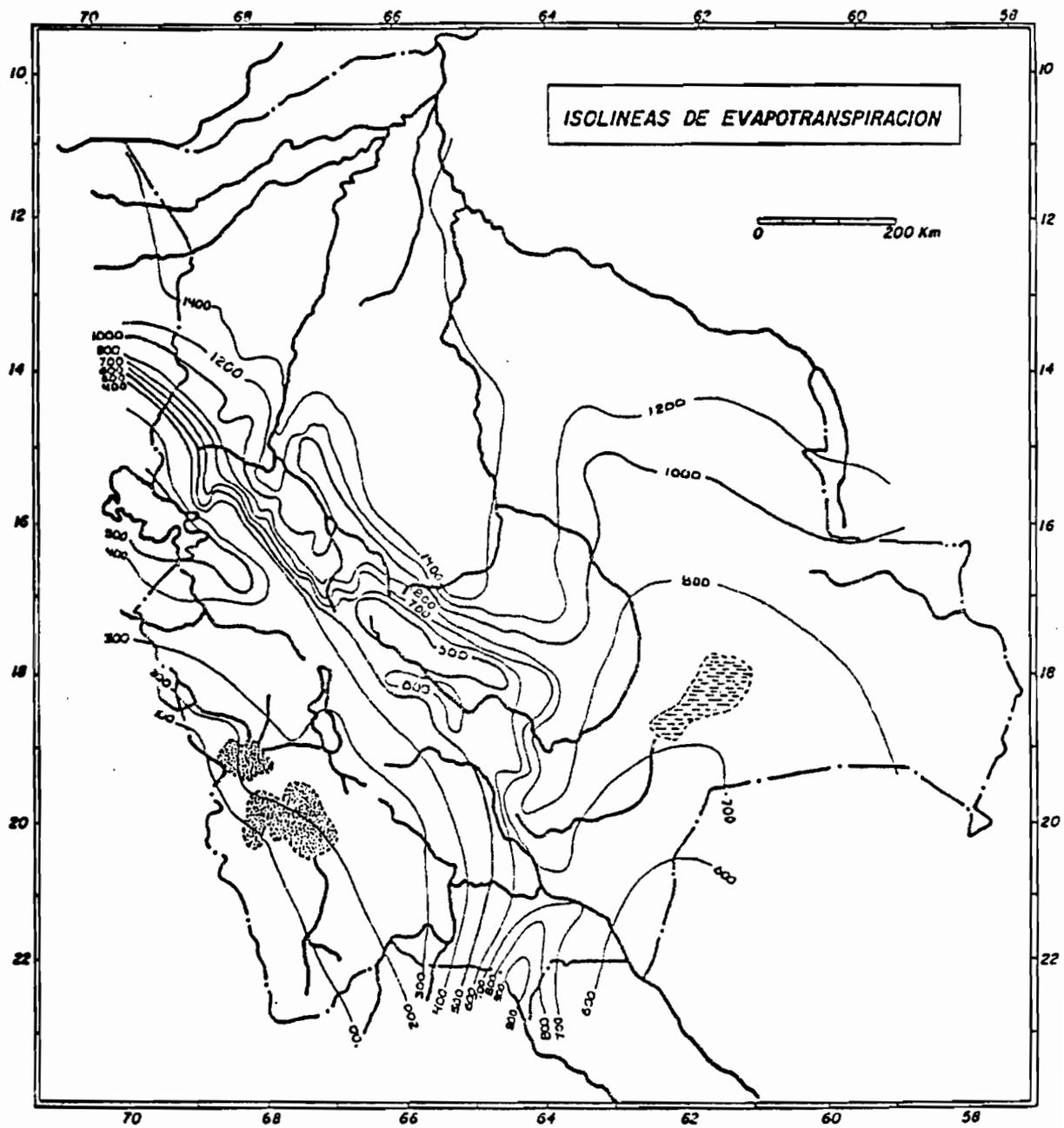


FIG. 4 EVAPOTRANSPIRACION MEDIA ANUAL EN MM/AÑO EVALUADA MEDIANTE TURC Y THORNTHWAITE

CUENCA	PUNTO DE CONTROL	AREA DE DRENAJE Km2	PRECIPI- TACION mm	EVAPOTRANS- PIRACION mm	ESCORRENTIA mm
1 BENI	Cuenca Andina	73670	1705	845	860
2 BENI	Llanos	48710	1956	1465	491
3 BENI	Conf. M. de Dios	112380	1805	1092	713
4 MADRE DE DIOS	Conf. Beni	125000	2715	1107	1608
5 ORTHON	Conf. Beni	32370	1896	1370	526
6 BENI	Con. Mamore	283350	2218	1134	1084
7 GRANDE	Cuenca andina	59840	751	615	136
8 GRANDE	C. oriental andina	29000	2992	1225	1767
9 GRANDE(s/total)	Cuenca andina	88840	1482	814	669
10 MAMORE	Llanura	133230	1821	1224	597
11 MAMORE	Conf. Itenez	222070	1685	1060	625
12 ITENEZ	Total Conf.Mamore	303280	1512	1227	285
13 MAMORE+ITENEZ	Conf.Mamore-Itenez	525350	1585	1156	429
14 YATA + Sub Cuenca Brasil	Conf.Mamore-Beni	42480	1817	1372	445
15 MAMORE	Total Conf.Beni	567830	1602	1172	430
16 MADERA	Salida de Bolivia	851180	1807	1160	647
17 LAGO TITICACA	Orilla del Lago	48590 (57283)*	653	470	182
18 RIO DESAGUADERO	Chuquina	29475	414	360	52
19 LAGO POOPO	Orilla del Lago	24800 (27740)*	370	315	55
20 SALAR COIPASA	Orilla	28065 (30170)*	302	270	32
21 SALAR UYUNI	Orilla	37505 (46625)*	189	152	37
22 RIO PILCOMAYO	Mision La Paz	92971	506	439	67
23 RIO BERMEJO	Juntas de San Antonio	16048	1070	714	356

* Area de la cuenca (suelo) mas superficie del lago

TABLA 1. BALANCE HIDRICO POR SUBCUENCAS

Evapotranspiración

La evapotranspiración fue evaluada de acuerdo a las recomendaciones de UNESCO [14]; se utilizaron las fórmulas de Thornthwaite y Mather y Turc para las superficies de cobertura vegetal y Penman para las superficies líquidas y zonas húmedas. La figura 4, muestra la tendencia de la isolíneas correspondientes.

La Evapotranspiración varía en la Amazonía entre 600 mm en la cuenca alta semiárida del Río Grande a 1500 mm en la cuenca del Río Orthon. En la Cuenca Altiplánica varía disminuyendo de Norte a Sur de acuerdo a la disponibilidad de humedad, tal es así que sobre el Lago Titicaca la evaporación supera los 1500 mm, llegando a valores cercanos a los 100 mm. en la zona de los salares.

En la cuenca de los Ríos Bermejo y Pilcomayo la ETR varía entre 600 y 900 mm con valores mínimos entre 200 y 300 mm.

Escorrentía

La distribución de las lluvias en estaciones lluviosa y seca, determina que en Los Andes y pie de montaña los hidrogramas sean de múltiples picos y abruptos, los cuales al reunirse aguas abajo con los hidrogramas de otros cursos tienden a laminarse. Se observa también que los hidrogramas de los Ríos Mamoré e Itenez tienen una apariencia laminada en contraste con los hidrogramas de los Ríos Beni y Madre de Dios debido a que las áreas de inundación de los primeros son mayores. (Roche y Fernandez, 1986; Bourges et al., 1988). Estas inundaciones se extienden sobre la superficie entre 100000 y 150000 Km².

La producción de los ríos de la Amazonía se muestra en la Tabla 1 que cuando convergen sobre el Río Madera producen un módulo de 17000 m³s⁻¹.

El Río Desaguadero para el período 1968-1982 evacúa 12,3 m³s⁻¹ en su salida del Lago Titicaca y cuando llega a la estación Chuquiña descarga 61 m³s⁻¹.

Los ríos Bermejo y Pilcomayo descargan un módulo del orden de 181 y 197 m³s⁻¹ en los puntos de control establecidos en este balance.

CONCLUSIONES

Se observa principalmente una distribución heterogénea de la precipitación en forma espacial lo cual muestra la figura 1 en base a la cual se emitieron las conclusiones expresadas en el resumen. Los mapas de isoyetas y de isolíneas de evapotranspiración muestran evidentemente que el Altiplano es una zona con poca disponibilidad de agua en relación a las otras cuencas.

Uno de los factores que incide en la aridez de los valles de la cuenca alta del Río Grande es el efecto de sombra de la cordillera, lo que no permite una disponibilidad satisfactoria de lluvia sobre esta región. Este fenómeno también es aplicable a los valles semi-áridos de La Paz.

Si bien la escorrentía se manifiesta en magnitudes importantes en la Amazonía ella resulta negativa especialmente cuando se producen las inundaciones debido a que los caudales rebazan las capacidades de conducción de los cursos de la llanura.

La figura 1, muestra que la precipitación media en Bolivia es del orden de 1230 mm anuales, en contraste con la media mundial 730 mm y la media en Sudamérica 1600 mm.[13]

La figura 2, muestra la distribución del área del territorio nacional con relación a la altura s.n.m. siendo la cota media de Bolivia del orden de 1350 m.s.n.m., en contraste con la media mundial 875 m.s.n.m.[13]

REFERENCIAS

- [1] ABASTO, N.; ALIAGA, A. Balance hídrico de la Cuenca del Río Madre de Dios. PHICAB 1987.
- [2] ARELLANO, R.; ALIAGA, A. Balance Hídrico de la Cuenca del Río Pilcomayo. PHICAB 1988.
- [3] BOURGES, J.; CORTÉS, J.; HOORELBECKE, R. Estudio de los Caudales del Mamoré en Guayaramerin. PHICAB 1987.
- [4] CAMACHO, F.; FERNANDEZ, N. Inventario Nivelógico de Bolivia IHH 1987.
- [5] CRUZ, C.; ALIAGA, A. Balance Hídrico de la Cuenca del Río Itenez. PHICAB 1987.
- [6] ESPINOZA, O.; PEÑA, J. Balance Hídrico de la Cuenca del Río Beni. PHICAB 1985.
- [7] GARCÍA, W.; PEÑA, J. Balance Hídrico de la Cuenca del Río Mamoré. PHICAB 1985.
- [8] LOZADA, G.; ALIAGA, A. Balance Hídrico de la Cuenca del Lago Titicaca. PHICAB 1985.
- [9] MARIACA, J.; ALIAGA, A. Bal.Hídrico de la Cuenca del Río Desaguadero, Lago Poopó, y Salares. PHICAB 1985.
- [10] ROCHE, M.A.; FERNANDEZ, C. WATER RESOURCES, Salinity and Salt Exportations of the Rivers of the Bolivian Amazon. J. of Hydrol., Elsevier, 1988, No 101, pp 305-331.
- [11] ROCHE, M.A.; ALIAGA, A.; CAMPOS, J.; CORTES, J.; PEÑA, J.; ROCHA, N. Heterogeneite des precipitations sur la cordillere des Andes boliviennes. Int. Conf. on Water Resources in mountaneous regions, AIH-AIHS, Lausanne, 1990. 8p.
- [12] ROCHE, M.A.; FERNANDEZ, C.; ALIAGA, A.; BOURGES, J., CORTES, J.; GUYOT, J.L.; PEÑA, J.; ROCHA, N. Water and Salt Balances of the Bolivian Amazon. Int. Seminar on Hydrology and Water Management opf the Amazon Basin, Manaus, Brazil 1990.
- [13] UNESCO. Balance Hídrico Mundial y recursos hidráulicos de la tierra. Instituto de Hidrología, UNESCO, 1980.
- [14] UNESCO/ROSTLAC. Guia metodologica para la elaboración del balance hídrico de America del Sur, UNESCO 1984.
- [15] ROCHE, M.A.; FERNANDEZ, C.; ALIAGA, A.; PEÑA, J. Balance Hídrico Superficial de Bolivia. ORSTOM-PHI/UNESCO-IHH, La Paz 1992.

RED HIDROMETRICA DE BOLIVIA Y BANCO DE DATOS

José CORTEZ M., Javier MENDOZA

SENAMHI, CP 10993, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

En esta sección trataremos sobre el desarrollo de la red y la instrumentación de las estaciones en las cuales se obtiene la información correspondiente a varios elementos.

LA RED HIDROMETRICA

La red Hidrométrica de Bolivia se formo a base de diferentes programas de instalación de estaciones, las primeras fueron instaladas en 1963, y en su mayoría en la década de 1970-1979 (cuadro 1). Esta red consistía tanto de estaciones Limnigráficas o de registro automático, como de estaciones únicamente con limnómetro o de lectura con observador.

Lamentablemente, por falta de apoyo presupuestario y de personal, la red hidrométrica ha venido en franca decadencia desde 1982, presentando a la fecha grandes deficiencias como se indica en el cuadro 2 el cual refleja la situación actual respecto a la condición originalde las estaciones. Aunque el número total de estaciones de ambos tipos ascendía a 188 puede inferirse que a la fecha, el número de estaciones es de poco más de la mitad (99) si lo vemos a nivel Nacional, sin embargo, en algunas regiones el porcentaje, de estaciones en funcionamiento es muy bajo.

En el cuadro 3 se presenta el cubrimiento de la red hidrométrica por cuencas (Estaciones de 1°,2°,y 3° Orden), para ser comparadas con las normas requeridas por la OMM para el establecimiento de una red hidrométrica mínima, debido a la escasa densidad de la población, a sus malas comunicaciones o a otras razones de orden económico. Respecto a la operacion de la red se tienen algunas deficiencias, motivadas por la falta de recursos disponibles para ello,y por las grandes distancias que tienen que recorrer las cuadrillas.

Las estaciones principales (primer orden) tienen un observador residente en el área, que lee diariamente la escala y efectúa varios aforos por mes y atiende el mantenimiento del limnógrafo, sin embargo, debido a los bajos salarios que perciben ha habido una fuerte deserción de esos observadores y consecuentemente ha bajado mucho el rendimiento de efectividad del trabajo, por otra parte, las cuadrillas encargadas de hacer la supervisión de las estaciones ha tenido que espaciar mucho las giras, hasta el punto de que algunas estaciones se visítan una o dos veces al año.

En base al inventario y diagnóstico de la actual red hidrométrica Nacional se ha diseñado un programa de rehabilitación de la red, en función de las prioridades que demandan los proyectos nacionales y el mantenimiento de una red mínima que permita obtener la informacion hidrológica necesaria cuantitativa y cualitativamente los recursos hídricos de nuestro país (por lo menos c/5 años). La figura 1 muestra el mapa del país, con la red hidrométrica actual. En algunas de las estaciones se toman muestras de sedimentos en suspensión y se realiza un monitoreo de la calidad de las aguas.

CUADRO Nro. 1: ESTACIONES HIDROMETRICAS 1er 2do y 3er ORDEN

DEPARTAMENTO	PERIODO DE INSTALACION			TOTAL
	63-69	70-79	80-92	
La Paz	16	59	2	77
Cochabamba	6	29	-	35
Tarija	2	29	-	31
Oruro	-	16	1	17
Chuquisaca	-	22	2	24
Sta Cruz	-	22	1	23
Potosi	2	6	4	12
Beni	-	-	20	20
Pando	-	-	2	2
TOTALES	26	183	32	261

CUADRO Nro. 2: ESTADO ACTUAL DE LA RED HIDROMETRICA

DEPARTAMENTO	NUMERO Y TIPO DE ESTACION		SITUACION ACTUAL		% que funciona
	LIMNIGRAFO	LIMNIMETRO	funciona	no funciona	
LA PAZ	25		10	15	40
		52	14	38	27
COCHABAMBA	10			10	0
		35	2	33	6
TARIJA	5		4	1	80
		26	10	16	38
ORURO					
		17	4	13	24
CHUQUISACA	5		1	4	20
		19	8	11	42
STA. CRUZ	3		1	2	33
		20	3	17	15
POTOSI					
		12	2	10	17
PROYECTO PHICAB					
		15	15		100
PANDO					
		2	2		100
TOTALES					
LIMNIGRAFOS	48		16	32	33
LIMNIMETROS		198	60	138	30

BOLIVIA

RED DE ESTACIONES HIDROMETRICAS

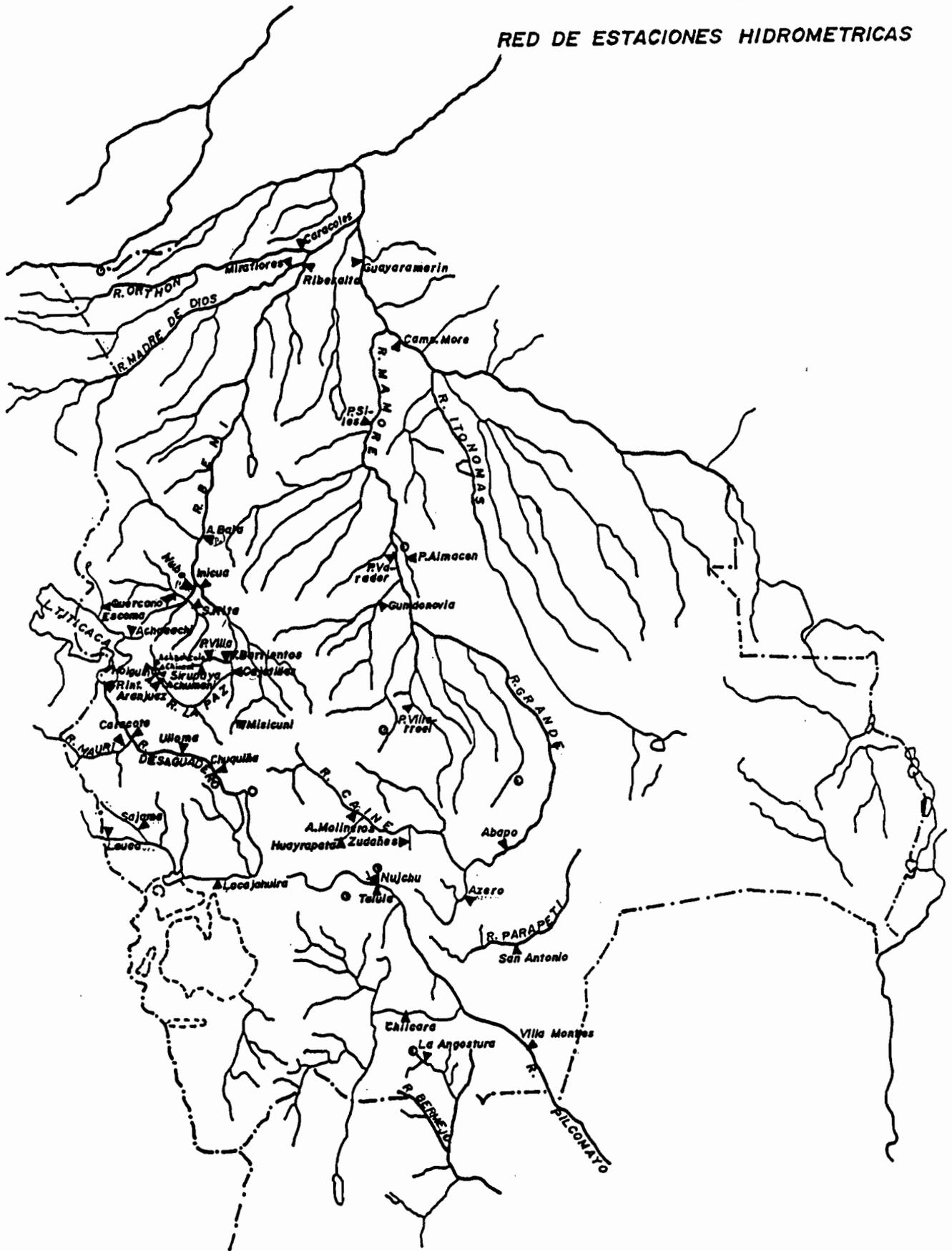


FIGURA 1

La Red se encuentra en un período de automatización a través de la instalación de 30 estaciones meteorológicas automáticas (fig. 2), cada una con los siguientes sensores:

LLuvia	Dirección del viento
Velocidad del viento	Temperatura Ambiente
Evaporación	Humedad Relativa
Radiación Solar	Temperatura del Suelo
Presión Atmosférica	Insolación

En cada capital de Departamento, el SENAMHI cuenta con una oficina Regional provista de un equipo de computación que sirve para la obtención de los reportes que generará este sistema. Se cuenta con una red de estaciones agrometeorológicas automáticas (tres) y tradicionales (ochenta) a nivel nacional, sirven para apoyar el desarrollo agrícola a través de la investigación y adaptación de algunos parámetros utilizados en el campo agrícola, estudios regionales de los diferentes factores meteorológicos.

Se encuentra en período de instalación una red de trece estaciones automáticas, conectadas a un sistema de radio transmisión en tiempo real a un computador, el cual tendrá un software que permitirá crear y ajustar un modelo matemático de flujos que puede ser utilizado para la previsión de las crecidas en la parte baja de la cuenca del río Mamore (Trinidad). Los sensores de cada estación son los siguientes:

Nivel del río	Precipitación
Temperatura	Radiación Solar
Dirección del viento	Velocidad del Viento

La instalación y rehabilitación de estaciones sobre nuestro territorio (Andes y Llanura) se hace muy dificultosa. En la zona de Los Andes la heterogeneidad de las cuencas hidrográficas, las dificultades para instalar equipos de observación (Limnigrafos, Pluviografos), las velocidades muy fuertes, el transporte de materiales sólidos (Suspensión y fondo). Las palizadas, la falta de vías de acceso a las diferentes regiones, la poca densidad poblacional y la falta de educación de nuestra población dificulta enormemente esta actividad.

En la zona de los Llanos la heterogeneidad de las cuencas hidrográficas, la inestabilidad de los márgenes de los ríos, cambio de la dirección de los meandros, acumulación de los sedimentos, vías de acceso a las cuencas muy dificultosas, alta concentración de sedimentos, secciones que varían desde los 4 mts, hasta los 40 mts de altura y 200 mts hasta 1000 mts de ancho, baja densidad poblacional y la falta de educación de los pobladores hace muy dificultosa la instalación de estaciones y peor aún mantenerlas.

A fin de poder observar y estudiar los principales cursos de agua, la red de estaciones hidrométricas, ha sido implantada, desde los Andes hasta la Llanura, aunque el número de estas estaciones parezca poca en relación a la superficie abarcada por los cursos de agua, es difícil aumentar la densidad de estaciones debido a la imposibilidad de encontrar observadores serios y responsables en estas regiones (principalmente llanos) poco habitadas y también debido al costo de mantenimiento y de explotación de estas estaciones. En cada estación, un observador efectúa tres veces al día lecturas sobre la escala limnométrica y realiza dos aforos a la semana (época de estiaje) y tres aforos (época de lluvia), en la zona andina; en la zona de llano el observador efectúa dos lecturas diarias de la escala limnométrica y cuando se realiza la campaña bimestral el jefe de comisión controla la calidad de las informaciones, mide el caudal, y si es necesario efectúa el mantenimiento de las estaciones. La red de pluviometría se encuentra reflejada en el cuadro 4.

Poseer información hidrológica es la clave para un desarrollo eficaz y ordenado y el control de los recursos hídricos. Trataremos los procedimientos que se utilizan respecto de las observaciones habituales, la transmisión, la preparación, y la publicación de esa información. Es necesario hacer una distinción entre los datos necesarios para pronósticos en tiempo real, o para monitoreo, y aquellos recogidos con el propósito de hacer un muestreo de la distribución de un elemento, a fin de identificar las estadísticas a largo plazo de esta

CUADRO 3
CUBRIMIENTO DE LA RED HIDROMETRICA POR CUENCAS
1ro. 2do. y 3er Orden

CUENCA	SUPERFICIE Km2	Nro. ESTACIONES	EST / Km2	GUIA OMM	
				LIM. DE LAS NORMAS RED MIN. EST/Km2	CIRCUNSTANCIAS DIFICILES EST/Km2
AMAZONICA	724.000	129	1/5612	1/1000-2500	1/3000-10000
DEL PLATA	229.500	39	1/5885	1/1000-2500	1/3000-10000
CERRADA	145.081	33	1/4396	1/300-1000	1/1000-5000
TOTAL	1098.581	201	1/5466		

CUADRO 4
ESTACIONES PLUVIOMETRICAS

DEPARTAMENTO	PLUVIOMET	PLUVIOGRAFO
LA PAZ	130	19
ORURO	41	7
COCHABAMBA	118	8
POTOSI	64	5
CHIQUISACA	72	12
SANTA CRUZ	47	15
TARIJA	11	9
BENI	2	2
PANDO	3	3
TOTAL	486	80

BOLIVIA

RED DE ESTACIONES METEOROLOGICAS AUTOMATICAS

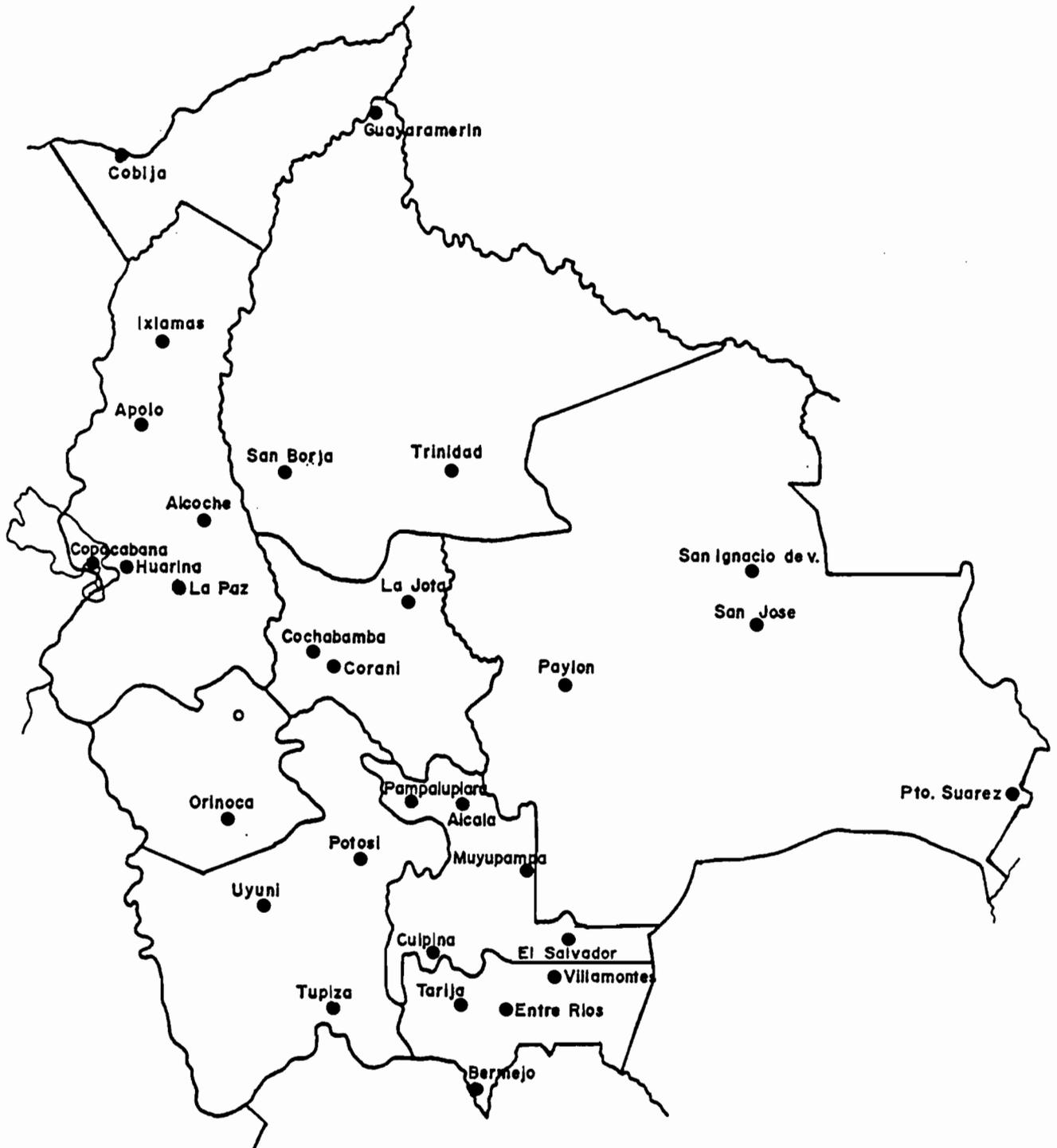


FIGURA 2

distribución, con fines de diseño.

Los datos hidrológicos pueden ser procesados en tres formas diferentes: el proceso en sí del dato y la revisión pre y pos-proceso. Para esta última parte es necesario contar con personal experimentado en tratamiento de datos hidrológicos, que conozca muy bien las secciones de aforo y la cuenca de donde proviene la información, en la revisión pre-proceso lo que se trata es de detectar errores de observación, mal funcionamiento del instrumento y en general, errores provenientes de las estaciones hidrométricas, a fin no solo de darle las indicaciones necesarias al procesador, sino también informar al personal encargado del mantenimiento de la red, para una rápida detección y corrección de las fallas posibles. En la revisión pos-proceso se detectan los errores propiamente de proceso y la forma más comúnmente utilizada es por medio de muestreos al azar de los datos ya procesados.

BANCO DE DATOS

Actualmente se utiliza el proceso mecanizado de datos el cual es llevado a cabo por un centro de cómputo y un paquete de proceso. La información proveniente de las estaciones hidrométricas después de una rápida revisión y clasificación por parte del personal experimentado, puede pasar a la computadora donde, con las medidas de control adecuadas dentro del software del sistema a emplear, la información es procesada y tabulada.

La figura 3, muestra lo que podrían ser los pasos a seguir por los datos hidrológicos, una vez que salen de una estación hidrométrica.

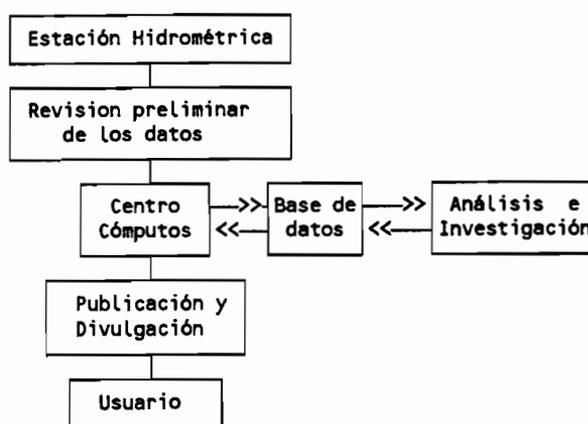


Fig # 3.- Diagrama de Flujo para el proceso mecanizado de Datos Hidrológicos.

Se observa también, las ventajas de utilizar un sistema computarizado es que los datos están siempre disponibles, ya sea para su análisis y uso científico, como también para su publicación y divulgación.

Para la interpretación de fajas o bandas registradoras (Limnigramas, Pluviogramas), se hace uso de un digitalizador acoplado a la computadora. Para la base de datos computarizado, a nivel Nacional se utiliza el siguiente Software y Hardware:

HARDWARE

- 4 Computadores P S

SOFTWARE

- Banco de Datos
- P L U V I O M
- H Y D R O M
- Para la interpretación de los datos
- Paquetes estadísticos
- Paquetes que manejan hojas electrónicas

A través del módulo de entrada y actualización de Datos se ha logrado ingresar al sistema de almacenamiento de las computadoras, toda la información histórica hidrológica a nivel nacional. Actualmente nos encontramos en la segunda fase que consiste en realizar el control de calidad primario y secundario de los datos, trabajo que tenemos previsto concluir a fines del próximo año, además de elaborar la publicación del Anuario Nacional de Datos Hidrológicos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es necesario una revisión de las políticas nacionales que fortalezcan al SENAMHI tales como condiciones salariales, equipamiento, laborales y una política de expansión de programas y actividades acorde con las necesidades de nuestro país y sus planes de desarrollo futuros.

Es necesario la instalación de aparatos de observación continua (limnigrafos y pluviografos) en las cabeceras de las cuencas, debido a la superficies pequeñas de las cuencas y a las variaciones muy rápidas del caudal, cuando es imposible contratar un observador responsable, o cuando las variaciones del nivel del agua son rápidas, como en las estaciones al pie de Los Andes.

Es necesario contar con una red de equipos de radio comunicación que permita tener actualizada la información para su tratamiento y control de calidad y posterior publicación.

Se requiere una red de computadoras a nivel nacional (para cada regional) las mismas que deben ser conectadas a un computador central de gran capacidad, el cual permita el acceso a toda la información.

BIBLIOGRAFIA

OMM, Guía de prácticas hidrológicas volumen 1, (1984), Adquisición y proceso de datos, N° 168

OMM, Guía de prácticas hidrológicas volumen 2, (1986), Análisis, predicción y otras aplicaciones, N° 168

UNESCO, Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de la América del Sur, (1982)

PLUVIOM, Manuel D'utilisation, (1991)

HYDROM, Manual del Usuario, (1989)

LOS REGIMENES HIDROLOGICOS DE LA CUENCA AMAZONICA DE BOLIVIA

*Jacques BOURGES⁽¹⁾, Robert HOORELBEKE⁽¹⁾, José CORTEZ⁽²⁾,
Luis M. CARRASCO N.⁽³⁾*

(1) Misión ORSTOM, C.P. 9214, La Paz, Bolivia

(2) SENAMHI, C.P. 10993, La Paz, Bolivia

(3) SHNB, C.P. 5962, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

De los 1100 000 km² de superficie de Bolivia, la cuenca amazónica ocupa cerca del 63%. Tanto por sus recursos humanos como naturales, esta región es de gran interés para el país. Su potencial, aún inexplorado, sobre todo en los llanos que constituye los tres cuartos de la cuenca, será en el futuro una oportunidad importante pero su valoración pasa por el conocimiento del medio, y en forma previa por el conocimiento de uno de los factores condicionales del desarrollo, los recursos en agua.

Gracias a los aportes de sus cuatro grandes tributarios, principalmente procedentes de Bolivia, el Madera participa con cerca del 8% a los aportes del Amazonas al Océano. Esto traduce la importancia de los recursos "exportados" por Bolivia. Pero contrariamente a otras riquezas, los recursos en agua varían en el tiempo, no solamente en el curso de un mismo año, sino también de un año al otro. Es la razón por la cual su estudio no puede efectuarse en algunos meses sino que exige años de observaciones laboriosas que lamentablemente uno está tentado de suspender a veces por falta de un objetivo aparente de corto plazo.

LA CUENCA AMAZONICA

Morfología

Imponiendo un carácter particular a esta región, por su masa y su dimensión, la Cordillera de los Andes, cuyas cimas culminan a más de 6500 metros, forma una barrera Norte-Sur casi infranqueable. En la latitud de Bolivia esta cadena se desdobra en dos cordilleras, una al Oeste y la otra al Este, encerrando una altiplanicie al medio de la cual se encuentra el lago Titicaca (Fig. 1). Caracterizan esta región dos grandes unidades fisiográficas:

- La Cordillera oriental, que posee dos niveles en su pendiente amazónica :

. La precordillera nacida del contacto de la llanura y del macizo andino, presenta un relieve poco acentuado entre los 500 y aproximadamente 2000 m de altura. Está recubierta por la selva tropical húmeda.

. La cordillera propiamente dicha, cuya línea de crestas raramente desciende por debajo de 5000 m, está constituida por una sucesión de cadenas marcadas, en cuya parte Norte se hallan varios glaciares "tropicales". La vegetación, ligada a la existencia de suelos y al clima, es casi inexistente arriba de 4600 m. Su densidad aumenta cuando la altitud decrece para alcanzar un cobertizo arbustivo homogéneo hacia los 3000 a 3500 m.

- La llanura amazónica que representa la zona más extendida está, generalmente, situada entre 100 y 200 m de altura, excepto en su borde occidental y al Sur, donde la acumulación de los sedimentos depositados por ríos a la salida de los Andes ha levantado el nivel de las tierras hasta alcanzar cerca de 500 m de altura.

Una parte de esta llanura, regularmente invadida por las inundaciones, está recubierta de vastas sabanas salpicadas de islotes forestales o de selva de galería. Cuando la altura sobrepasa 200 m, la selva avanza sobre la sabana.

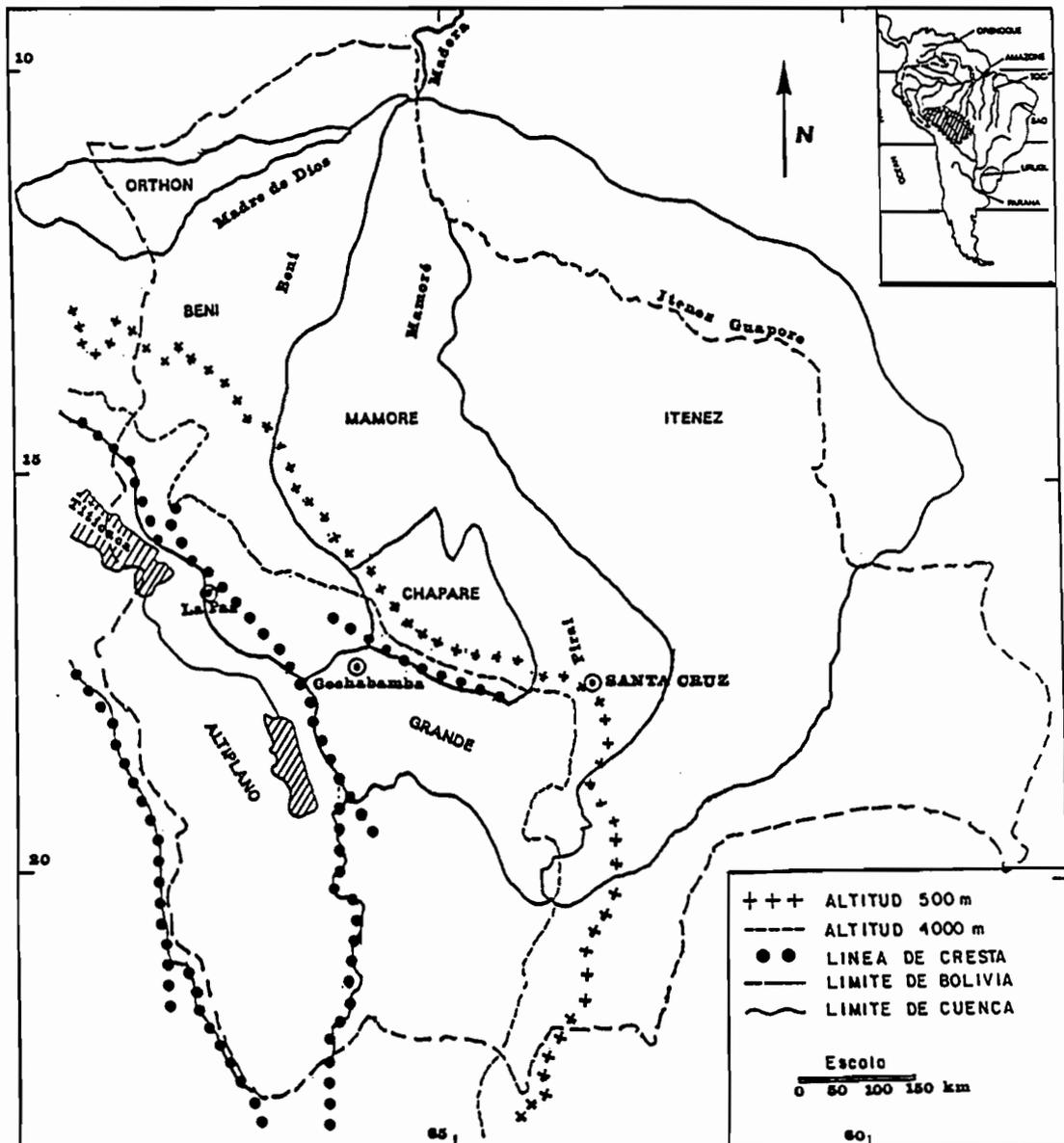


Fig. 1: Mapa de situación de las cuencas del sistema ando-amazónico.

Clima y Precipitaciones

La variación estacional del clima está determinada por los movimientos de la zona Intertropical de Convergencia y de anticiclones del Atlántico y del Pacífico. A esta influencia atmosférica viene a sobreponerse, en los Andes, la influencia de la altura que va a producir climas fríos, y de la orografía que va a crear micro climas (Roche, 1986; Ronchail, 1986).

La distribución espacial de las lluvias aparece muy distinta según las regiones. Puede variar de 500 mm por año en la alta cuenca del río Grande, a cerca de 6000 mm en ciertas zonas de las cuencas del Chapare. En la llanura, la pluviometría decrece de Norte a Sur con promedios de 1800 mm sobre las cuencas del Mamoré y del Beni, y más de 2000 mm sobre el del Madre de Dios (Bourges, 1989; Roche, 1985, 1990).

La distribución temporal de las lluvias mensuales en el curso del año, presenta la misma forma sobre el conjunto de la cuenca amazónica. Las precipitaciones más fuertes caen durante el verano austral, de diciembre a marzo. Según las regiones, puede haber el resto del año una estación seca bien marcada o lluvias muy frecuentes.

Hidrografía

La cuenca amazónica, que se extiende sobre 708 000 km² en territorio boliviano, controla, en el nacimiento del Madera en Villa Bella, una superficie total de 913 000 km² repartida en tres países, que en más de un 26% se encuentra en la zona andina. Cuatro grandes ríos drenan esta inmensa cuenca. Tres descienden de los Andes, el Beni, el Madre de Dios, el Mamoré y el cuarto, el Itenez - Guaporé, toma su fuente en el escudo brasileño. Estos cuatro ríos confluyen en el límite de la frontera con el Brasil para formar el Madera.

EL REGIMEN HIDROLOGICO

Cómo definir un régimen hidrológico?

El régimen hidrológico de un río es el modo de variación de su caudal en el tiempo. En pequeña escala, toma la forma de simples crecidas de algunas horas, o de algunos días. En escala media, es la variación estacional con los períodos de aguas altas y los estiajes. A gran escala, se trata de las variaciones interanuales, de los años secos o lluviosos. Es evidente que este modo de variación, y por lo tanto el régimen, dependen de las lluvias, lo que da un carácter aleatorio, pero también de la cuenca hidrográfica del río que tiene características bien definidas, que varían poco en el tiempo.

El régimen hidrológico puede caracterizarse principalmente por tres tipos de parámetros:

- parámetros de caudal: caudales extremos, promedio de un período dado...
- parámetros de tiempo: tiempo de subida, de concentración...
- parámetros adimensionales: razón de caudales extremos, coeficiente de variación de una serie...

Una vez caracterizado el régimen, es interesante determinar similitudes entre cuencas para constituir zonas hidrológicamente homogéneas, pero también relacionar estos parámetros característicos con los diferentes factores que influyen sobre el régimen, ya sea que se trate de factores climáticos o físicos.

Método y datos utilizados

El estudio se basa sobre más de noventa cuencas cuyos datos siempre fueron tratados y que pudieron ser tomados en cuenta solamente para ciertos análisis. Trece de las cuencas fueron observadas en el marco del programa PHICAB, desde 1983 hasta 1990; adicionalmente se utilizaron diez estaciones situadas a lo largo de la frontera a cargo de los servicios brasileños (DNAEE). La mayor parte, es decir 67 cuencas, que forman parte de la red de Bolivia, fueron observadas con una calidad desigual, sobre todo después de 1982 por diversas instituciones (ENDE, SENAMHI, SHNB...).

Llegando a ser determinante el criterio de duración de observación para la mayoría de los análisis efectuados, obligó a reducir la prueba a cincuenta cuencas y a veces menos de veinte. La homogeneización por el Vector Regional (MVR) fue aplicada sistemáticamente a fin de llenar las lagunas o de extrapolar los períodos, pero solamente a nivel mensual, y cuando lo permitía el número de cuencas.

La repartición, tanto a nivel espacial como temporal de estas observaciones, es muy heterogénea, ya que cerca del 80% de las estaciones se encuentran situadas en los Andes que, en superficie, sólo representan un cuarto de la cuenca, y que los períodos de observación, desigualmente repartidos entre 1960 y 1982 en la parte andina, no corresponden a los de las estaciones situadas en la llanura que empiezan en 1983.

Los regímenes hidrológicos de la cuenca amazónica

Los regímenes hidrológicos de tipo tropical de transición, se caracterizan por un período de aguas altas, en general, de febrero a marzo en las cabeceras de cuenca, período que corresponde a la estación de las lluvias del verano austral. Las aguas bajas, de julio a septiembre, pueden recibir, según las regiones, el soporte de las lluvias episódicas. Los caudales de punta de crecida, "estimulados" por el relieve andino, desaparecen rápidamente en la llanura. El aspecto dentado del hidrograma anual, provocado por la respuesta rápida de las cabeceras de cuencas a las precipitaciones, tiende a alisarse en el curso inferior del Mamoré y del Itenez, después de la travesía de importantes llanuras de inundación que laminan y retardan las crecidas para dejar aparecer río abajo tan solo una crecida anual, perfectamente regular (Bourges, 1987; Roche, 1986).

DETERMINACION DE ZONAS HOMOGENEAS

Es probable que las grandes unidades morfológicas descritas anteriormente inducen "comportamientos hidrológicos" diferentes. Si en la llanura se puede esperar observar una cierta homogeneidad en los parámetros hidrológicos que caracterizan el escurrimiento, es evidente que la Cordillera genera regímenes que están muy influenciados por el relieve.

A fin de discriminar estos "comportamientos hidrológicos", en un primer enfoque, se puede utilizar el parámetro más simple, el caudal medio anual o módulo, que dada la repartición estacional, será calculado en el año hidrológico, generalmente desde octubre hasta septiembre. Por una correlación logarítmica entre el módulo y la superficie, que es el principal parámetro físico, cuidando de eliminar las series muy cortas, inferiores a cinco años, se evidencian dos familias de puntos sobre las que se ajustan dos rectas (Fig. 2). La representación logarítmica se impone en este caso dada la variación de escala que nos hace pasar de cuencas de algunas decenas de km² a un millón de km², o cerca de un m³ s⁻¹ a 20 000 m³ s⁻¹.

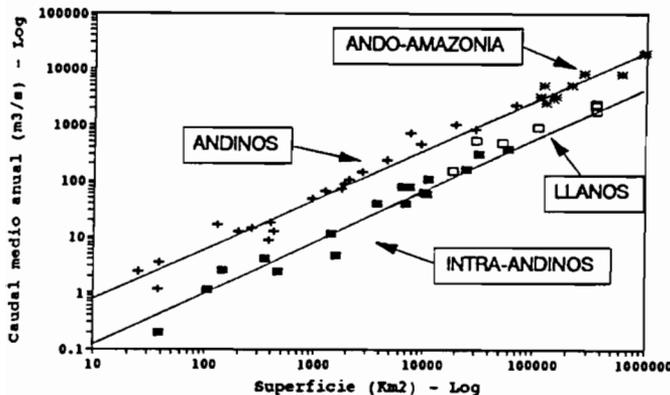


Fig. 2: Módulos del año hidrológico en función de la superficie de las cuencas.

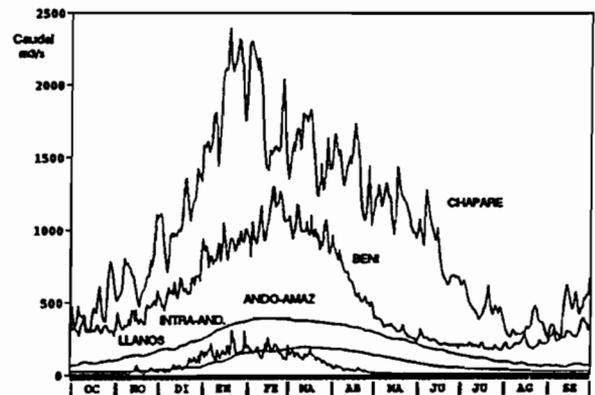


Fig. 3: Hidrograma promedio de una cuenca de 10 000 km²

A pesar de un ajuste menos bueno de los puntos representativos para las cuencas de superficie inferior a 200 km² el coeficiente de correlación continúa satisfactorio con valores superiores a 0,98 para dos grupos de puntos correspondientes a dos familias de cuencas.

En el análisis aparece que el módulo no es un parámetro bastante discriminante pues estas dos familias no son homogéneas:

- la recta superior agrupa las cuencas del Beni, del Chapare y sus prolongaciones en la llanura, sufriendo todos una influencia andina,

- la recta inferior agrupa las cuencas del Río Grande y la llanura, es decir, las cuencas protegidas por relieves o sin ninguna relación con los Andes.

Aunque la aparente similitud de los módulos en cada uno de estos dos grupos pueda interpretarse por el efecto de la influencia andina, es necesario, para continuar el análisis, determinar grupos morfológicamente más homogéneos. Se distinguirán entonces:

- las cuencas andinas situadas en el costado amazónico de la Cordillera Oriental, al Este de la línea de cresta, que serán designados como "**cuencas andinas**". Dado el trazado de la Cordillera, convendrá distinguir dos subgrupos: las cuencas del **Beni**, y las del **Chapare**, más meridionales y más irrigadas.

- las cuencas andinas situadas al Oeste de la línea de cresta o de los primeros relieves importantes que pueden jugar un rol de línea de cresta, como es el caso, al Sur del paralelo 17, con las cordilleras situadas al Este de Cochabamba. Encontrándose al interior del macizo andino, protegidas en parte de la influencia amazónica, estas cuencas serán llamadas "**cuencas intra-andinas**".

- las cuencas cuya parte superior se sitúa en la Cordillera pero que reciben también en su parte inferior la contribución de aguas de llanura. Experimentando esta doble influencia, serán designadas como "**ando-amazónicas**".

- las cuencas de **llanura** que no experimentan ninguna influencia andina.

En regla general, hemos utilizado para la continuación del análisis, la clasificación en cinco regiones que representan los dos subgrupos y los tres grupos de cuenca buscando las similitudes entre subgrupos o grupos.

A fin de concretar la diversidad de regímenes de estos diversos grupos, fue trazado un hidrograma promedio en un período de tres años para una cuenca de 10 000 km² (fig. 3). Se observa que, tanto por la forma del hidrograma como por la importancia de los aportes, el régimen de escurrimiento puede ser muy diferente.

VARIACIONES ESTACIONALES

Período de altas aguas

Sobre el conjunto de las cuencas andinas o intra-andinas, el período de aguas altas dura aproximadamente tres meses, generalmente, de enero a marzo. Este período es idéntico en la llanura sobre los ríos ando-amazónicos hasta aproximadamente una distancia de 500 a 800 km del pie de monte. Más allá de este límite y hasta la formación del Madera, las aguas altas se desfazan progresivamente y pasan más bien de febrero a abril, lo que corresponde a las aguas altas observadas en las cuencas de llanura donde las velocidades de propagación son mucho más lentas.

No obstante, en el curso inferior del Mamoré y del Itenez, aguas abajo de las llanuras de inundación que retrasan la crecida anual, se observa que el período de aguas altas se sitúa frecuentemente entre los meses de marzo y mayo (Guyot, 1992).

Variabilidad estacional

El volumen de los aportes de los tres meses de aguas más altas, restituído al volumen de los aportes anuales, proporciona un coeficiente, K_{3m} , que mide la amplitud de la variación del hidrograma anual.

El estudio de la variación de este coeficiente en función de las superficies de las cuencas permite establecer que:

- en dos de las cinco regiones, parece no existir ninguna relación entre K_{3m} y la superficie (Llanura, Intra-andinos),

- en las otras regiones, los coeficientes K_{3m} disminuyen en función inversa de la superficie (Fig. 4),

- en estas mismas regiones, los puntos se ajustan bien a una correlación no lineal; pero cuatro cuencas del Beni no parecen seguir la misma ley, siendo K_{3m} más bajo que el valor esperado.

Se comprueba que estas cuatro cuencas, que culminan entre los 5800 y 6400 m, reciben el aporte de glaciares importantes que modifican sensiblemente la repartición de los escurrimientos en el año. Convendrá entonces, en este caso, tratar estas cuatro cuencas como un subgrupo particular (Fig. 4).

La correlación de tipo exponencial, aplicada a estos grupos, proporciona un conjunto de curvas que convergen, en las grandes superficies, hacia un valor del coeficiente K_{3m} de 40 a 45% (Fig. 4). Se observa también que los valores más bajos de K_{3m} , y por lo tanto, la mejor repartición de los aportes en el año, se da en el Chapare donde las precipitaciones son frecuentes fuera de la estación de lluvias (clima tropical de transición) y en las cuencas sobre las cuales los glaciares restituyen en estación seca una parte de los aportes de la estación de lluvias.

Aunque simple de establecer, el coeficiente K_{3m} no siempre permite delimitar el máximo sobre un intervalo de tres meses calendario, por lo que se lo puede substituir por el máximo anual del promedio móvil de los caudales diarios, sobre un período de 90 días, restituído a un caudal medio anual, K_{90} .

La comparación efectuada sobre la base de este coeficiente, comparación limitada a veinte estaciones, proporciona valores de K_{90} casi idénticos a K_{3m} para las grandes cuencas, y ligeramente superiores, de 1 a 2% para las pequeñas cuencas. Esto justifica entonces la elección de K_{3m} y confirma la validez de las observaciones efectuadas.

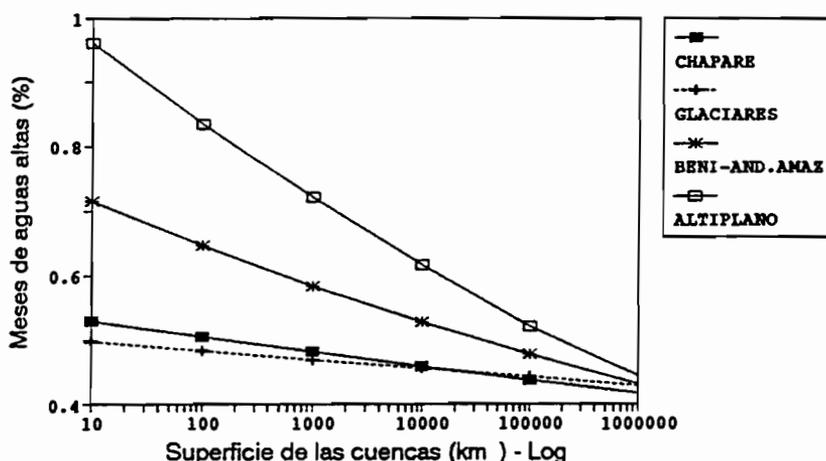


Fig. 4: Proporción de los 3 meses de aguas altas en relación al escurrimiento anual.

VARIABILIDAD DE LOS CAUDALES DIARIOS

Para proceder a este análisis, podemos utilizar diferentes métodos: ya sean métodos estadísticos como el análisis de las frecuencias de caudal, o simplemente, el cálculo del coeficiente de variación, lo que lleva a considerar el caudal como una variable aleatoria, o métodos de autocorrelación que permiten analizar la variación del caudal en el tiempo y evaluar en qué medida los caudales de varios días consecutivos están ligados. A fin de determinar un máximo de criterios que caracterizan la región, utilizaremos los tres métodos.

No obstante, debido a las numerosas lagunas en los registros de caudales diarios, no es posible analizar todas las cuencas. En la muestra de 20 estaciones estudiadas, se constata (Fig. 5 y 6):

- que en todas las cuencas **intra-andinas**, el coeficiente de variación es siempre superior a 1, generalmente cercano a 2, y que el autocorrelograma traduce un mal coeficiente de correlación entre el caudal de un día y el del día anterior, de 0,8 a 0,9 en promedio. En un intervalo de 20 días, este coeficiente cae a 0,4 - 0,5. El histograma de las frecuencias de caudal, establecido a partir de un corte de treinta y cinco grupos de caudal iguales, deja aparecer un primer grupo de caudales próximos del estiaje con 25% de frecuencia mientras que los caudales más elevados sólo tienen una frecuencia más baja, inferior a 1%.

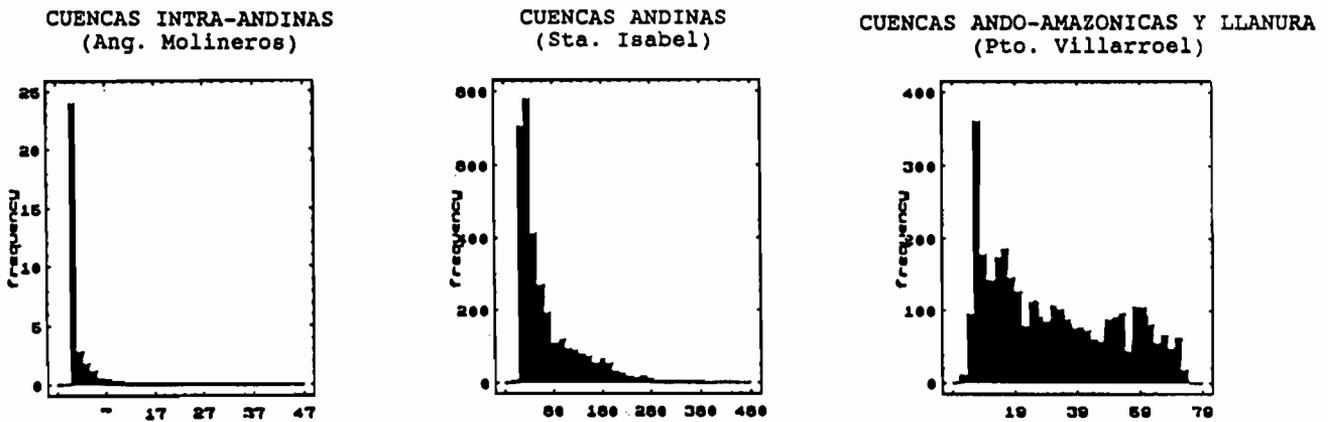


Fig. 5: Histogramas de las frecuencias de caudales diarios.

- que en las cuencas **andinas** del **Beni** y del **Chapare**, el coeficiente de variación oscila entre 0,6 y 0,9, y que el autocorrelograma traduce una mejor correlación de día a día, de 0,90 a 0,95 en promedio. No obstante, no teniendo estas cuencas gran superficie, el coeficiente de autocorrelación decrece rápidamente y alcanza 0,6 - 0,7 sobre un intervalo de 20 días. El histograma de las frecuencias de caudales es más macizo. Las frecuencias más fuertes, observadas en el caudal más bajo, varían de 9 a 11%.

- que en las cuencas **ando-amazónicas** y las cuencas de **llanura**, el coeficiente de variación permanece en el intervalo 0,6 - 0,9, y que la autocorrelación proporciona un coeficiente entre dos días consecutivos de 0,99 que se mantiene por encima de 0,8 después de un intervalo de 20 días. La frecuencia máxima de caudal se sitúa entre 2 y 5%, pero todas las clases de caudal tienen prácticamente la misma frecuencia.

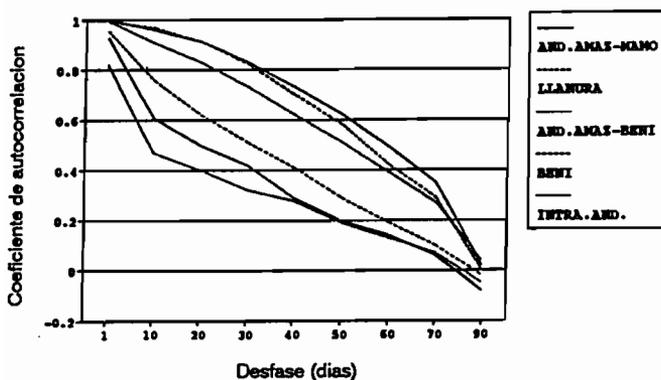


Fig. 6: Variación del coeficiente de autocorrelación según el intervalo de tiempo.

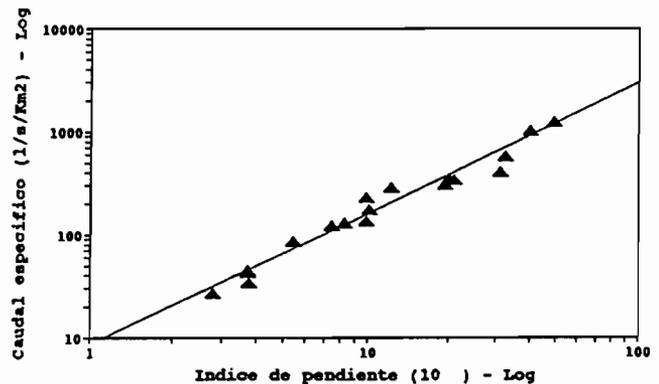


Fig. 7: Caudal específico diario máximo decenal en función del índice de pendiente.

El autocorrelograma pone en evidencia el comportamiento particular de ciertas estaciones de llanura para las cuales el coeficiente de autocorrelación decrece muy lentamente y permanece superior a 0,85 en un intervalo de 30 días. Estas estaciones, situadas aguas arriba

de importantes llanuras de inundación, reciben caudales muy influenciados por el vaciado de estas llanuras, fenómenos muy lentos y bien autocorrelacionados.

En fin, se constata (Fig. 6) que, en todas las cuencas andinas, cualquiera que sea su clasificación, el intervalo por el que el coeficiente de autocorrelación se anula antes de invertirse es de 80 a 85 días, mientras que para el conjunto de cuencas de las llanuras es de 90 a 100 días. Este lapso de tiempo, de 90 días aproximadamente, parece corresponder a la duración de las estaciones y justifica la elección del período adoptado anteriormente en el cálculo del promedio móvil.

CAUDALES MAXIMOS

Las observaciones sobre esta región, son relativamente recientes, por lo que no se dispone, salvo excepción, de largas series de datos. El análisis estadístico es pues más delicado y menos representativo. Después de un primer criterio de duración fijado en diez años de observación que dejaba muy pocas estaciones y mal repartidas, se han debido utilizar las series de observación iguales o superiores a ocho años.

Los tests de ajuste a las diversas leyes estadísticas no evidencian una ley que se aplica perfectamente a todas las cuencas. No obstante, la ley que se ajusta mejor a las diferentes categorías de cuencas, cualquiera sea su situación geográfica, es la ley de Gumbel.

Por ajuste a esta ley, fueron calculados los caudales diarios máximos de diecisiete cuencas que presentan series de medidas suficientemente largas y completas. Los caudales máximos instantáneos, de mayor interés para los acondicionamientos, no siempre son conocidos por falta de registro continuo. Si se compara el caudal específico diario máximo decenal con el índice de pendiente de la cuenca, la influencia "lógica" del relieve está confirmada por una muy buena correlación que parece ignorar la división en regiones ya que todos los puntos representativos confundidos se ajustan, en coordenadas logarítmicas, en una sóla y misma recta (Fig. 7).

LAMINA ESCURRIDA

La heterogeneidad física de la zona estudiada y la amplitud del relieve hacen que el régimen de las precipitaciones y la pluviometría anual sean muy variables de una región a otra, y muchas veces de una cuenca a otra. La precipitación media sobre las cuencas, bastante precisa cuando se dispone de una buena red de aparatos, puede ser aproximativa, incluso errónea, cuando hay una densidad demasiado débil de pluviómetros, o, como ocurre a menudo en la zona andina, cuando los aparatos son instalados en el fondo de valles estrechos.

A fin de estudiar la relación precipitación-escurrimiento y de discernir eventualmente un carácter regional, se relaciona la precipitación media sobre una cuenca con el parámetro que mide el escurrimiento, y de la misma dimensión que la precipitación, la lámina escurrida. El gráfico (Fig. 8) evidencia un grupo de cuencas que reciben una altura de lluvia superior a 1200 mm por año y en el cual se puede considerar que existe poca relación entre precipitación y altura de escurrimiento superficial.

Este grupo representa la llanura y las regiones ando-amazónicas y andinas, con excepción del Beni, para el cual las alturas de lluvias son incoherentes con las alturas de escurrimiento superficial (Carrasco, 1990).

Por debajo de 1200 mm, es decir, en las regiones "semi áridas", la dispersión es tal que es difícil vislumbrar una relación válida. En todo caso, la imprecisión sobre la determinación de la precipitación media no permite evidenciar caracteres regionales ni establecer una relación correcta entre lluvia y escurrimiento.

La búsqueda de otros factores, en particular fisiográficos, en relación con la lámina escurrida, no proporciona sino resultados mediocres:

- la altura no es un factor principal debido al rol preponderante del relieve.

- la latitud juega un rol en llanura donde existen gradientes pluviométricos pero no interviene sobre la vertiente andina.

- la orientación de los valles, según sean sus ejes paralelos o perpendiculares en el sentido de desplazamiento de las masas de aire húmedo amazónico, no parece ser un factor importante.

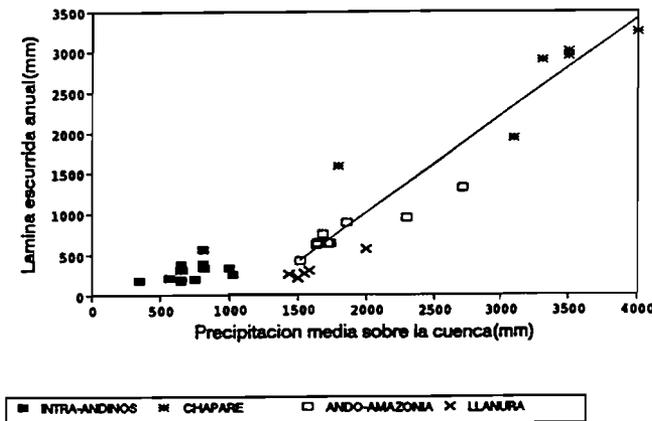


Fig. 8: Relación lámina escurrida - precipitación media sobre la cuenca.

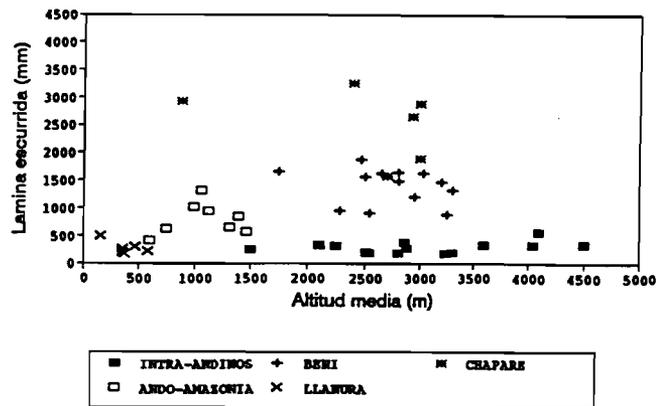


Fig. 9 Relación lámina escurrida - altitud media de la cuenca.

CONCLUSIONES

Del análisis de estos diferentes parámetros, resulta que las grandes unidades morfológicas no corresponden siempre a unidades "hidrológicas". Así, en la Cordillera, el factor esencial que diferencia dos zonas de regímenes hidrológicos muy diferentes, las cuencas andinas e intra-andinas, es la orografía. Pero al interior de las cinco "regiones" elegidas se puede constatar una buena homogeneidad de los parámetros representativos aunque, en el caso del grupo ando-amazónico, la particularidad de ciertas cuencas de estar "encajonadas" relativiza los resultados del análisis.

Al interior de algunos grupos, el análisis permite revelar el rol de otros factores, difícilmente cuantificables, como la presencia de glaciares, o la influencia de las llanuras de inundación. El análisis permite finalmente reducir el rol, que a priori, habría parecido primordial, de la altitud en este sistema ando-amazónico dominado por la imponente cadena de los Andes.

REFERENCIAS

- ABASTO N, (1987). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Madre de Dios, Bolivia, Perú. PHICAB: CONAPHI, IHH-UMSA, ORSTOM, SENAMHI. Tesis UMSA, La Paz, 295 p.
- BOURGES J, CORTES J, HOORELBECKE R (1987). Estudio de los caudales del Mamoré en Guayaramerín. PHICAB: ORSTOM, SENAMHI, 20 p.
- BOURGES J, GUYOT JL, CARRASCO M, BARRAGAN MC, CORTES J (1990). Evolución espaciotemporal de los caudales y materias particulares en una cuenca de los Andes bolivianos: el Río Beni. Hydrology in Mountainous Regions, Lausanne, August 1990. IAHS Publ. 193: 351-356.
- BOURGES J, GUYOT JL, HOORELBECKE R, ROCHE MA (1990). Analysis of water flow and transportation of sediments in an Andes-Amazon basin: the River Beni at Riberalta. Hydrology and Water Management of the Amazon Basin, Manaus, August 1990.
- BOURGES J, GUYOT JL, ROCHE MA (1989). La investigación francesa en cooperación en la Amazonia boliviana: el programa PHICAB. A Amazonia na França, Belem, Octubre 1989, 17 p.

CARRASCO M (1990). Estudio del régimen del escurrimiento superficial en la cuenca andina del Río Beni. Tesis UMSA, Publ. PHICAB, La Paz.

CRUZ C (1987). Balance hídrico superficial de la Cuenca del Río Itenez, Bolivia, Brasil. PHICAB: CONAPHI, IHH-UMSA, ORSTOM, SENAMHI. Tesis UMSA, La Paz, 218 p.

GUYOT JL, BOURGES J, CALLE H, CORTES J, HOORELBECKE R, ROCHE MA (1989). Transports of suspended sediments to the Amazon by an andean river: the Mamore river - Bolivia. IRTCES, 106-113, River Sedimentation, Beijing, November 1989.

GUYOT JL, BOURGES J, HOORELBECKE R, ROCHE MA, CALLE H, CORTES J, BARRAGAN M (1988). Exportation de matières en suspension des Andes vers l'Amazonie par le Río Beni, Bolivie. Sediments Budgets, Porto Alegre, December 1988. IAHS Publ. 174: 443-451.

GUYOT JL (1992). Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie Bolivienne. Thèse de doctorat, géologie-géochimie, Université de Bordeaux I, 362 p.

MONTES de OCA J. Geografía y recursos naturales de Bolivia.

ROCHE MA, ALIAGA A, CAMPOS J, PEÑA J, CORTES J, ROCHA N (1990). Hétérogénéité des précipitations sur la Cordillère des Andes boliviennes. Hydrology in Mountainous Regions, Lausanne, August 1990, IAHS Publ. 193: 381-388.

ROCHE MA, FERNANDEZ JAUREGUI C, APOTEKER A, ABASTO N, CALLE H, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. PHICAB: IHH-UMSA, LHM, ORSTOM, SENAMHI, 257 p.

ROCHE MA, ROCHA N (1985). Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 4.000.000. PHICAB: ORSTOM, SENAMHI, 1 hoja offset.

RONCHAIL J (1986). Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie - Bolivie. PHICAB: AASANA, IFEA, ORSTOM, SENAMHI, 36 p.

RONCHAIL J (1988). Variabilidad del tiempo en Bolivia, la anomalía climática del invierno 1988. Conferencia en la Academia de Ciencias. Publ. PHICAB, La Paz, 15 p.

DISTRIBUCION REGIONAL DE LA HIDROQUIMICA EN LA CUENCA AMAZONICA DE BOLIVIA

*Jean Loup GUYOT⁽¹⁾, Jorge QUINTANILLA⁽²⁾, Moisés CALLIDONDE⁽²⁾,
Héctor CALLE⁽³⁾*

(1) ORSTOM, CP 09747, 70001-970 Brasilia DF, Brasil

(2) IIQ-UMSA, CP 303, La Paz, Bolivia

(3) SENAMHI, CP 996, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

A continuación de los trabajos de Sioli (1950, 1957, 1968), quien ha sido el primero en caracterizar las aguas de la cuenca amazónica, fueron realizados en el Brasil numerosos estudios sobre la hidroquímica de esta vasta cuenca, que tratan sobre los grandes ríos y lagos de Várzea (Gessner, 1960; Gibbs, 1967, 1972; Williams, 1968; Ungemach, 1972; Schmidt, 1972; Richey et al., 1980, 1991; Stallard y Edmond, 1983; Furch, 1984; Forsberg et al., 1988).

En Bolivia se realizaron observaciones, algunas ya antiguas (Crespo, 1901), sobre la química de las aguas de la cuenca amazónica, dentro del marco de estudios puntuales, relacionadas con las poblaciones biológicas (Pilleri y Gihl, 1977; Corbin et al., 1988; Iltis, 1988) con problemas de irrigación de valles andinos (Magat, 1981), o al estudio local de fenómenos hidrogeológicos (Quintanilla et al., 1989). Pero el estudio global y profundo de la físico-química del conjunto de los ríos de la cuenca amazónica de Bolivia empezó con los trabajos del PHICAB (Roche et al., 1986, 1991; Roche y Fernandez, 1988; Guyot, 1986, 1992, Guyot et al., 1987, 1988, 1989, 1991; Wasson et al., 1989).

LA PREPARACION DE MUESTRAS Y LOS ANALISIS

Este estudio trata sobre 395 ríos de variada importancia, desde los glaciares de la cordillera de los Andes, hasta los ríos de llanura amazónica, pasando por los ríos de montaña semi-árida (Figura 1). Los puntos de agua fueron objeto de pruebas regulares en diferentes épocas hidrológicas en las estaciones más accesibles, y de pruebas ocasionales donde el acceso es difícil. El número de muestras obtenidas por estación desde 1983 a 1991 varía de 1 a 105, con un valor mediano de 2, y cuartiles inferior y superior (25% y 75%) de 1 y 5. En las estaciones de la red PHICAB, donde en 1986 fue realizado un muestreo decadal, el número de muestras varió de 35 a 105 según la seriedad de los observadores.

Todas las muestras fueron analizadas en La Paz en los laboratorios del SENAMHI (Conductividad, MES por filtración y peso, color y turbiedad por absorción molecular, HCO₃ por volumetría) y del IIQ-UMSA (Cl, SO₄ y SiO₂ por absorción molecular, Ca, Mg y Fe por absorción atómica, Na y K por espectrometría de llama).

LOS APORTES ATMOSFERICOS

La atmósfera es una fuente importante de materias en solución para las aguas de superficie (Gibbs, 1970). La estimación de los aportes terrestres de materias disueltas a los ríos pasa por una corrección de esta influencia atmosférica, basada en los tenores en cloruros de la lluvia y de los ríos, que son generalmente inversamente proporcionales al alejamiento de las costas (Meybeck, 1983). En la cuenca amazónica, el decrecimiento de los tenores en Cl⁻ de las aguas de lluvia en función de la distancia al Océano Atlántico es claro y progresivo en una distancia de 3000 km. Estos aportes atmosféricos no son dominantes, salvo en aquellos ríos de

la zona costera (Stallard y Edmond, 1981). Utilizando los datos y el método de cálculo de Stallard, las concentraciones en Cl^- de origen oceánico en los ríos de la cuenca del Río Madera en Villabella deberían estar comprendidos entre 4 y 6 mmol.l^{-1} (de 0.14 a 0.21 mg.l^{-1}), de Oeste a Este de la cuenca. Dado que estas concentraciones son equivalentes a la precisión de los análisis en cloruros efectuados en La Paz, la corrección de los aportes atmosféricos no ha sido efectuada en este estudio.

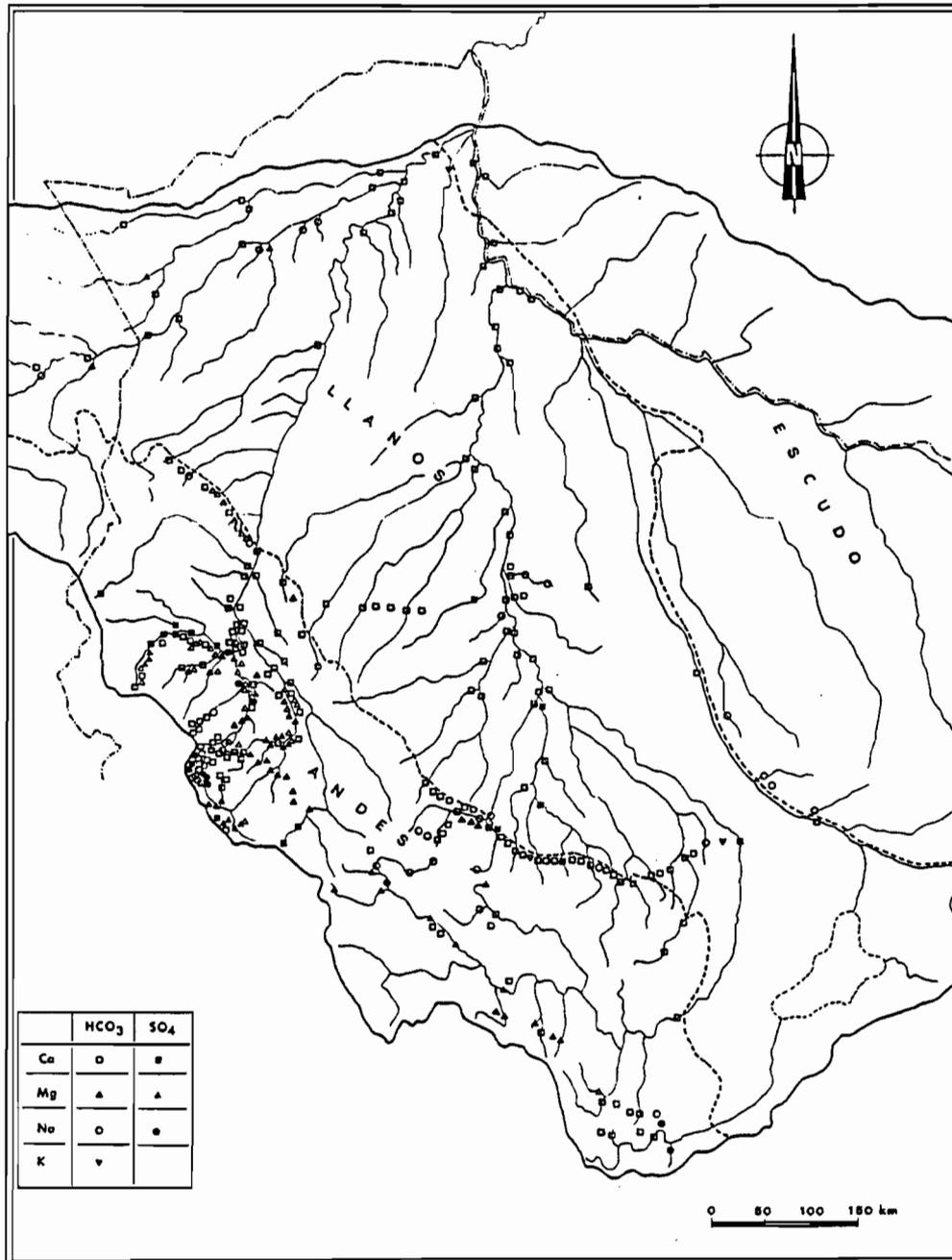


Fig. 1: Mapa de los iones dominantes de los ríos de la Amazonía boliviana, 1983-1991 (Según J.L. Guyot, 1992)

LOS RESULTADOS

Para simplificar la interpretación de estos datos hidroquímicos, 6 subcuencas fueron definidas, entre las cuales se encuentran 3 subcuencas andinas, siguiendo la denominación

propuesta por Roche (1986). La cuenca andina del Río Beni (Alto-Beni), comprende los ríos drenados por los ríos Kaka y Alto-Beni, así como los procedentes de los Andes y que se reúnen con el Río Beni en los Llanos (Ríos Madidi, Tequeje, etc.). La cuenca andina del Río Grande comprende los ríos drenados por el Río Grande, pero también por el Río Parapeti al Sur, y los ríos Pirai y Yapacani al Norte. En fin, las cuencas andinas orientales son los tributarios andinos del Río Mamoré situados al Oeste del Río Yapacani (ríos Ichilo, Ichoa, Sajta, Chimoré, Chapare, Secure, Isiboro, Apere, Yacuma, etc.). Los Llanos están clásicamente subdivididos en dos subcuencas, la del Río Beni y la del Río Mamoré. El escudo fue apenas muestreado por razones de dificultad de acceso y de lejanía de La Paz. Los diez ríos muestreados en el escudo pertenecen a la cuenca del Río Mamoré, irrigado por los formadores del Río Itenez (ríos Guaporé, Blanco-Baures, Itonamas, San Julián, etc.).

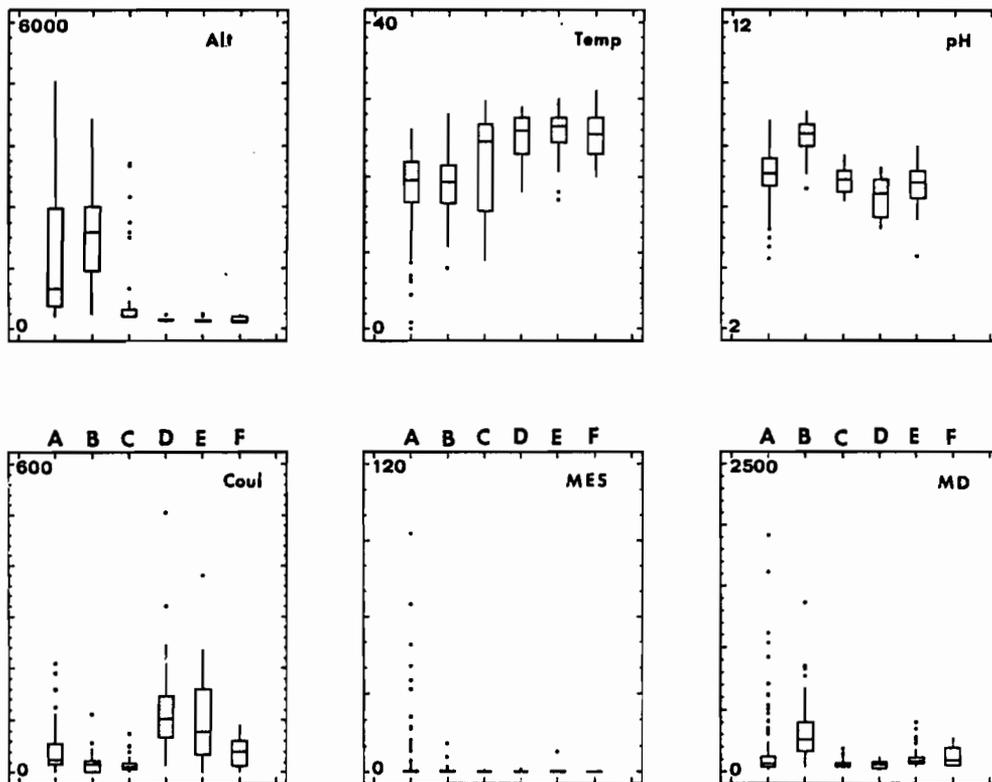


Fig. 2: Distribución estadística (mediana, cuartiles, déciles, extremos) de la físico-química de los ríos de la Amazonía boliviana, 1983-1991. A= Alto Beni, B= Grande, C= cuencas orientales, D= Beni, E= Mamoré, F= Escudo (según J.L. Guyot, 1992).

(Altura en m., temperatura en °C, color en unidades Pt/Co, MES en $g.l^{-1}$, MD en $mg.l^{-1}$)

La distribución de la altura y de la temperatura del agua de los puntos muestreados permite distinguir el dominio andino del resto de la cuenca (Figura 2). En la cuenca del Alto Beni, la gama altitudinal es la más extensa, pero el promedio es inferior a 1000 metros, mientras que en la cuenca del Río Grande, el promedio es próximo a los 2000 metros. En las cuencas andinas orientales, las alturas son claramente más bajas a pesar de algunos valores extremos, que traducen un muestreo esencialmente de piedemonte. Los datos del gráfico referentes al escudo deben tomarse con precaución debido al reducido muestreo (12 estaciones).

Los valores del pH medido en el terreno muestran valores claramente más altos en la cuenca del Río Grande. Los promedios más bajos son obtenidos en los Llanos, aunque los valores mínimos son observados en cursos de agua de bajo tenor en materias disueltas, resultado de la oxidación de la pirita. Las aguas más coloradas se encuentran en los Llanos, debido a la presencia de materia orgánica. Las materias en suspensión (MES) presentan medianas y cuartiles próximos, pero con extremos que pueden alcanzar $100 g.l^{-1}$ en la cuenca del Alto Beni (región de La Paz). La dispersión regional de las materias disueltas (MD) es más

grande en los Andes que en la planicie amazónica, con valores altos en la cuenca del Río Grande, y valores bajos en los Llanos y las cuencas andinas orientales. Las aguas que drenan el escudo brasileño tienen una mineralización intermedia, y el Alto Beni presenta un valor mediano bajo a pesar de los valores extremos muy altos, traduciendo una cuenca heterogénea. La distribución de los tenores en materias disueltas en función de la altitud (Figura 3), muestra que si las concentraciones más fuertes son observadas en las cuencas de los ríos Alto-Beni y Grande, los tenores bajos se observan en cambio en todos los dominios estudiados.

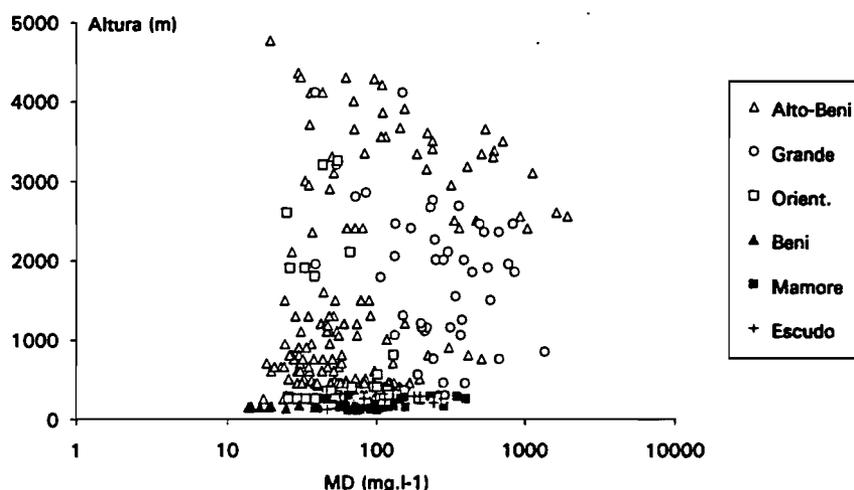


Fig. 3: Materias disueltas y altitud, ríos de la Amazonía boliviana, valores promedios para el período 1983-1991 (según J.L. Guyot, 1991).

La suma de cationes (TZ^+) presenta con toda lógica una distribución comparable a la de las materias disueltas (Figura 4). Cerca de algunas variantes, esta distribución se encuentra en los gráficos de los elementos mayores dominantes (HCO_3^- , SO_4^{--} , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+). En cambio, el potasio presenta tenores relativamente más altos en los Llanos y el escudo, aunque aún se observan fuertes tenores en las cuencas andinas, asociados al drenaje de series evaporíticas. Las concentraciones en hierro son claramente más fuertes en los Llanos que en los Andes, a pesar de los tenores localmente elevados en ciertos valles andinos. La distribución de la sílice disuelta indica que las aguas procedentes del escudo presentan los tenores más fuertes, mientras que no existe una diferencia significativa en las otras cuencas.

La sílice disuelta, cuyos tenores parecen globalmente estables, presenta variaciones que no están relacionadas a la salinidad del agua. El porcentaje de sílice disuelta es inversamente proporcional al tenor global en materias disueltas (Figura 5). En las aguas poco mineralizadas, la sílice puede representar más del 60% de las materias en solución. En realidad, la sílice disuelta, unida a la intensidad de la alteración, depende del clima y los tenores disminuyen generalmente con la altura (Meybeck, 1986).

Globalmente, las aguas de la llanura amazónica se distinguen de las de los tributarios andinos por un color poco marcado, un pH más bajo, tenores en materias disueltas bajos, y una abundancia relativa en potasio, hierro y algunas veces en sílice disuelta. Estas tendencias descubiertas en la cuenca del Amazonas, fueron estudiadas en detalle en la Amazonia boliviana con ayuda del análisis factorial (Guyot et al., 1988).

En función de los iones dominantes, pueden ser definidas diferentes facies hidroquímicas. La mayoría de los ríos encontrados son de tipo bicarbonatado, más frecuentemente cálcico o magnesiano, a veces sódico, y raramente potásico (Figura 1). En los Andes y en algunos ríos de los Llanos, las aguas encontradas son sulfatadas y corresponden, en general, a salinidades más fuertes.

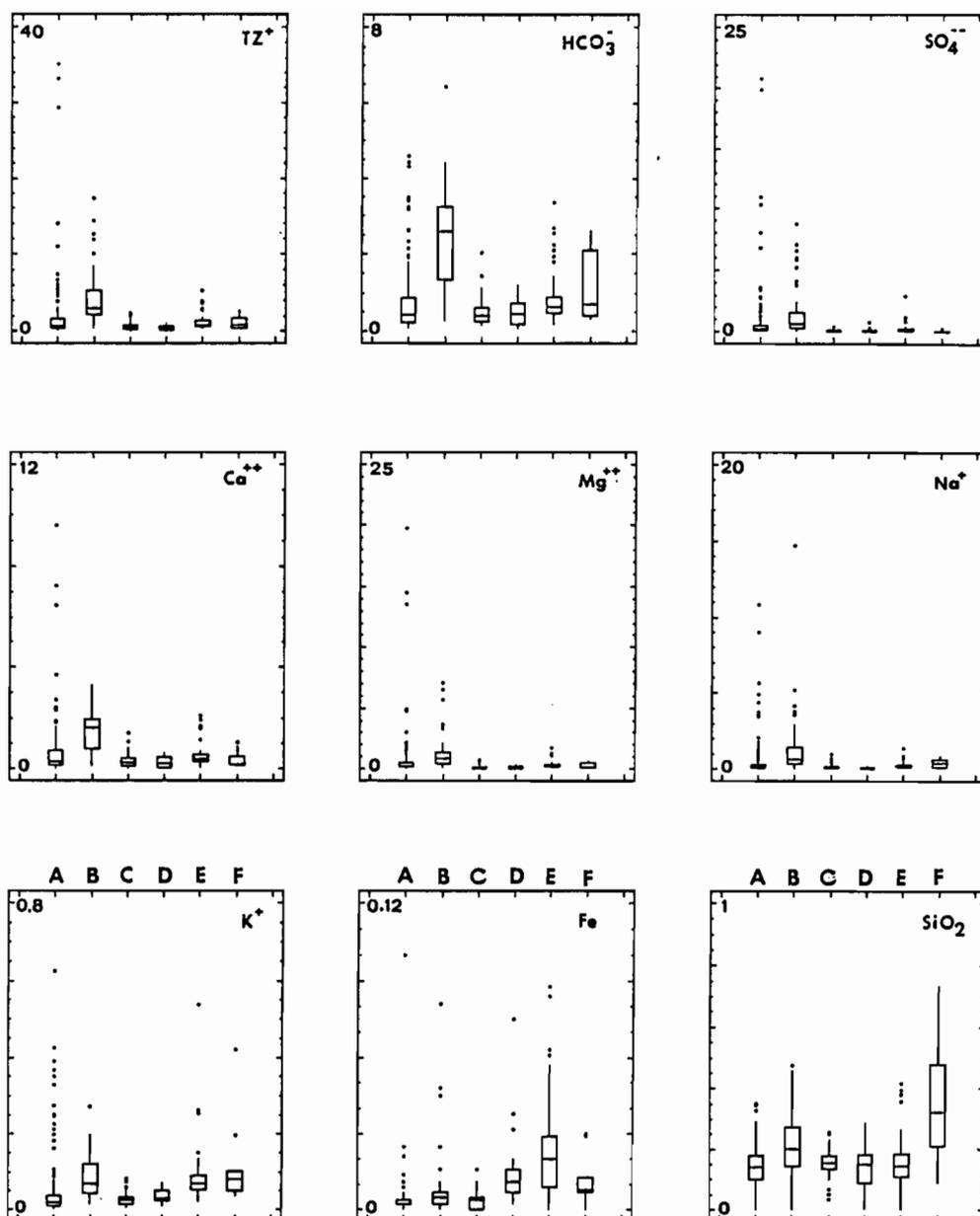


Fig. 4: Distribución estadística (mediana, cuartiles, deciles, extremos) de los elementos mayores en solución de los ríos de la Amazonía boliviana, 1983-1991. A= Alto Beni, B= Grande, C= Cuencas orientales, D= Beni, E= Mamoré, F=Escudo (según J.L. Guyot, 1992)
 (TZ+, HCO₃⁻, SO₄⁻⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Fe⁺⁺, en meq.l⁻¹, SiO₂ en mmol.l⁻¹).

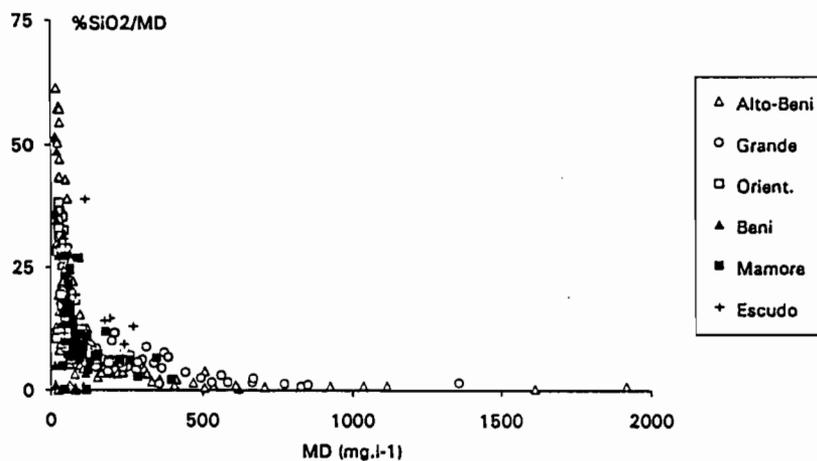


Fig. 5: SiO₂/MD vs. MD, ríos de la Amazonia boliviana, valores medios por el período 1983-1991 (según J.L. Guyot, 1992).

LAS CARACTERISTICAS HIDROQUIMICAS DE LAS CUENCAS ANDINAS

En las cuencas andinas, cerca de 300 ríos fueron objeto de análisis hidroquímicos, 66% de éstos en la cuenca del Alto Beni más próxima a La Paz y donde existen numerosas vías de comunicación. Las concentraciones más fuertes ($>1000 \text{ mg.l}^{-1}$) son registradas en las zonas semi-áridas de la región de La Paz-Luribay, así como en las cuencas de los ríos Grande y Parapeti, y están asociadas a facies sulfatado-magnésicas, incluso sulfatado-sódicas. Los tenores más bajos ($<50 \text{ mg.l}^{-1}$) se encuentran río arriba de los sistemas hidrológicos en la Cordillera Real, o incluso en las zonas de piedemonte del Chapare, y están esencialmente asociadas a facies bicarbonatado-cálcicas o magnésicas. Los coeficientes de variación obtenidos ($\text{CV} = \text{desviación tipo/promedio}$) del conjunto de los parámetros estudiados, muestra que la variabilidad regional más grande concierne a las materias en suspensión, y a la turbiedad. En las materias disueltas, la sílice parece ser el elemento más estable.

Cuenca del Río Alto Beni

En la cuenca del Alto Beni, los tributarios de los ríos Tipuani, Challana, Zongo, Coroico, Unduavi, Taquesi, Tamampaya y Miguillas, que drenan las cimas intrusivas de las cordilleras Real y de Quimsa Cruz (Tres Cruces), así como la espesa serie sedimentaria detrítica del Ordovícico, presentan tenores en materias disueltas inferiores a 100 mg.l^{-1} . Los tenores en sílice sobrepasan frecuentemente el 50% de la mineralización total. Las aguas son casi exclusivamente bicarbonatadas, con algunos ríos con sulfatos dominantes debido a la abundante presencia de pirita en los afloramientos. En el valle de Sorata-Consata-Mapiri, aguas arriba presenta tenores ($<100 \text{ mg.l}^{-1}$) parecidos a los de los ríos Tipuani y Challana próximos. Aguas arriba el aumento brutal de la salinidad, así como de las materias en suspensión observadas, en el Río Consata (de 300 a 500 mg.l^{-1}) provienen de erosión de las series detríticas del Silúrico-Devónico. Las aguas de este río son de tipo sulfatado-cálcico, debido a la existencia de series yesíferas localmente karstificadas. Luego, los tenores en materias disueltas no cesarán de disminuir desde aguas arriba hacia aguas abajo por el efecto de la dilución por aportes menos mineralizados.

En la cuenca de los ríos La Paz, Sapahaqui y Luribay, se observa el mismo fenómeno, con aguas bicarbonatadas de escaso tenor en materias en solución en la cuenca alta del Río Palca, que drena las formaciones intrusivas del Illimani. En La Paz, los ríos procedentes de las series sedimentarias plio-cuaternarias (ríos Huayllani, Quellumani, Achumani) que presentan fuertes cargas en MES, tienen tenores en materias disueltas comprendidos entre 100 y 300 mg.l^{-1} . Hacia río abajo, la salinidad aumenta fuertemente durante la travesía de las series detríticas del Silúrico-Devónico, y los tenores de 500 a 2000 mg.l^{-1} son frecuentemente observados en las aguas que son sulfatadas.

El aumento de la salinidad en las cuencas de los ríos Consata-Mapiri, La Paz, Sapahaqui y Luribay durante la travesía de las series del Silúrico-Devónico está probablemente relacionada a la presencia de niveles yesosos, pero también a la alteración de pizarras negras. Esta alteración produce eflorescencias blancas que se ponen en solución durante episodios lluviosos. En estiaje, aparecen en el lecho desecado de estos ríos depósitos salinos de la misma naturaleza. El análisis geoquímico de estos depósitos mostró que están esencialmente constituidos por sulfatos y magnesio (Roche et al., 1986). Los dos elementos mayores de estos depósitos (S y Mg) son altamente solubles, y el lavado de estos terrenos por las aguas de lluvia ocasiona un aumento de salinidad hacia el polo sulfatado-magnésico, característico de las aguas con fuerte mineralización de esta región.

Hacia aguas más abajo, los ríos Kaka, Boopi y Alto Beni reciben, durante la travesía del subandino, los aportes de afluentes modestos cuyos tenores están comprendidos entre 100 y 200 mg.l^{-1} , y casi siempre de tipo bicarbonatado cálcico o magnésico. Este aumento de la salinidad en el subandino está, muy probablemente, relacionado a los depósitos sedimentarios terciarios que están ampliamente representados en esta región. Los tributarios andinos del Río

Beni que drenan el borde septentrional de los Andes (de Rurrenabaque a Ixiamas) presentan las mismas características.

Cuenca del Río Grande

En la cuenca del Río Grande, sometida a un clima más árido, las concentraciones observadas varían de 40 a 1000 mg.l⁻¹, y alcanzan valores de 1400 mg.l⁻¹ en la cuenca del Río Parapeti situado más al Sur. Las concentraciones más bajas son observadas río arriba, en los contrafuertes de la Cordillera de Tunari, cerca de Cochabamba, donde las aguas de tipo bicarbonatado-cálcico. Las aguas más cargadas en sales disueltas, son también aquellas que transportan más materias en suspensión, y provienen de las series del Silúrico-Devónico, drenadas por los formadores occidentales del Río Caine (ríos Tapacari, Arque). La facies de estas aguas es generalmente de tipo sulfatado magnésico.

Durante la travesía del valle de Cochabamba, la salinidad aumenta también debido al afloramiento de series salíferas y yesosas del Mesozoico (Magat, 1981). Aguas más abajo, en la región de Torotoro, los afluentes de la orilla derecha procedentes de los formadores carbonatados karsificados del Cretáceo llevan aguas bicarbonatadas cálcicas, cuyos tenores están comprendidos entre 200 y 400 mg.l⁻¹. Los tributarios andinos del Río Grande en los Llanos (ríos Yapacani y Piraí) también tienen concentraciones comprendidas entre los 200 y 400 mg.l⁻¹, y una facies bicarbonatada cálcica. La sílice disuelta raramente representa más del 10% de la mineralización en estas cuencas andinas.

Cuencas andinas orientales

En las cuencas andinas orientales, los tenores encontrados son claramente más bajos y no pasan jamás de 150 mg.l⁻¹. En el Chapare, las concentraciones medias son frecuentemente inferiores a 50 mg.l⁻¹. Las aguas son generalmente de tipo bicarbonatado cálcico, algunas veces magnésico. Son observados tenores más importantes en el subandino, en la región de Villa Tunari donde los formadores del Río Chapare presentan tenores ligeramente superiores a 100 mg.l⁻¹. Sucede lo mismo con los tributarios andinos del Río Yacuma, así como con los tributarios del Río Beni, esta salinidad ligeramente más alta parece provenir de las series sedimentarias terciarias del subandino.

LAS CARACTERISTICAS HIDROQUIMICAS DE LOS LLANOS

En los llanos de la cuenca del Río Madeira en Villabella, 88 ríos fueron muestreados, sin considerar los procedentes del escudo brasileño, 35 pertenecientes a la cuenca del Río Beni y 53 a la cuenca del Río Mamoré. Las concentraciones encontradas son generalmente más bajas que en los Andes, debido al fenómeno de dilución por los aportes laterales de los ríos de llanura. Los fuertes tenores del Río Grande se hacen sentir bastante lejos hacia aguas abajo. Los coeficientes de variación (CV) en cada uno de los elementos muestran que la variabilidad regional de los tenores es más baja en los Llanos que en los Andes, sobre todo para Cl, Mg, Na y Fe. Lo esencial de esta variabilidad es causado por el Río Grande.

Cuenca del Río Beni

En las cuencas de los ríos Beni, Madre de Dios, Orthon, los afluentes de la llanura, que drenan exclusivamente los depósitos sedimentarios cuaternarios, tienen salinidades muy bajas, comprendidas entre 15 y 50 mg.l⁻¹, las facies hidroquímicas están mal definidas (bicarbonatada cálcico-sódico-magnésico), y la sílice puede representar el 30% de las materias disueltas. Los ríos que tienen un origen andino están ligeramente más mineralizados (de 50 a 100 mg.l⁻¹), mientras que los ríos que drenan las series sedimentarias terciarias (ríos Tahuamanu, Boyuyo) presentan los tenores más fuertes (de 100 a 120 mg.l⁻¹).

Cuenca del Río Mamoré

En la cuenca del Río Mamoré, el Río Grande marca fuertemente el sistema de las aguas aún cargadas (300 mg.l^{-1}) en la confluencia con el Río Ichilo. Los tenores más bajos ($<50 \text{ mg.l}^{-1}$) son observados en algunos afluentes de llanura del Río Ichilo (ríos Chimoré, Chore), situados a proximidad del piedemonte andino, o en la región de Trinidad (Río Mocovi). Los afluentes de la orilla izquierda del Río Mamoré en los Llanos presentan concentraciones comprendidas entre 50 y 150 mg.l^{-1} , para una facies hidroquímica casi exclusivamente bicarbonatada cálcica. Estos tenores, que son más altos que los observados en los afluentes del Río Beni, conciernen también a los ríos que no tienen origen andino (ríos Iruyane, Tijamuchi, etc.). Esta diferencia puede deberse a la existencia de series sedimentarias terciarias no cartografiadas, que llevan consigo generalmente un aumento de la salinidad. Pero es posible que los fenómenos de evaporación que intervienen en las zonas de inundación que en estas cuencas están muy extendidos, acarrear también un aumento de la mineralización. El Río Yata, que drena exclusivamente los Llanos, presenta una mineralización de 50 mg.l^{-1} y un facies bicarbonatado potásico.

LAS CARACTERISTICAS HIDROQUIMICAS DEL ESCUDO BRASILEÑO

Una docena de ríos de llanura, procedentes del escudo brasileño, fueron muestreados. Este pequeño número de muestras se explica por las dificultades de acceso y de distancia de La Paz. Los coeficientes de variación obtenidos (CV) indican una variabilidad regional de los tenores bastante baja, a pesar de un muestreo reducido.

Los resultados obtenidos permiten distinguir dos tipos de ríos. Los afluentes de la orilla derecha del Río Mamoré (ríos Negro y Ouro Preto), así como el Río Guaporé-Itenez, presentan tenores bajos ($<50 \text{ mg.l}^{-1}$), y de tipo bicarbonatado cálcico. Estos ríos drenan esencialmente las series precámbricas plutónicas ácidas del zócalo (Pareja et al., 1978). Un segundo grupo está compuesto por ríos claramente más mineralizados (de 80 a 300 mg.l^{-1}), generalmente de facies bicarbonatado sódico. Estos ríos que drenan el borde meridional del zócalo, proceden de las series del complejo metamórfico precámbrico.

REFERENCIAS

- AHLFELD F., BRANISA L. 1960. Geología de Bolivia, Ed. Don Bosco, La Paz, 245 p.
- CORBIN D., GUYOT J.L., CALLE H., QUINTANILLA J. 1988. Datos físico-químicos de los medios acuáticos de la zona del Mamoré central, región de Trinidad, Amazonia boliviana. Publ. Orstom, La Paz, N°8, 58 p.
- CRESPO L.S. 1901. Monografía de la ciudad de La Paz. Boletín de la Sociedad Geográfica de La Paz 7, 8: 237-268.
- FORBERGERG B.R., DEVOL A.H., RICHEY J.E., MARTINELLI L.A., LOS SANTOS H. 1988. Factors controlling nutrient concentrations in Amazon floodplain lakes. Limnology and Oceanography 33(1): 41-56.
- FURCH K. 1984. Water chemistry of the Amazon basin: The distribution of chemical elements among freshwaters, 167-199. In The Amazon, Sioli H. (ed.). W. Junk, Dordrecht.
- GESSNER F. 1960. Ensayo de una comparación química entre el Río Amazonas, el Río Negro y el Río Orinoco. Acta Científica Venezolana 11(2): 63-64.
- GIBBS R.J. 1967. The Geochemistry of the Amazon River System. Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. Geological Society of America Bulletin 78: 1203-1232.

- GIBBS R.J. 1970. Mechanisms controlling World Water Chemistry. Science 170: 1088-1090.
- GIBBS R.J. 1972. Water Chemistry of the Amazon River, Geochimica et Cosmochimica Acta 36: 1061-1066.
- GUYOT J.L. 1986. Evolución en el espacio y el tiempo de las concentraciones de materia en solución y en suspensión de las aguas de la cuenca amazónica de Bolivia, 48-53. *In* 1er Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia. La Paz, Sept. 1986. Publ. Orstom, La Paz.
- GUYOT J.L. 1992. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de Doctorat, Univ. Bordeaux, 362 p.
- GUYOT J.L. CALLE H., QUINTANILLA J., CALLICONDE M. 1987. Resultados de una campaña de muestreo en periodo de aguas bajas en la Amazonia boliviana. Revista Boliviana de Química 7(1): 36-50.
- GUYOT J.L., CORBIN D., QUINTANILLA J., CALLICONDE M. CALLA H. 1988. Caracterización físico-química de los ríos y lagunas de la cuenca amazónica de Bolivia, 98-106. *In* 2do Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- GUYOT J.L. ROCHE M.A., BOURGES J. 1989. Etude de la physico-chimie des eaux et des suspensions des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne: exemple du Rio Beni, 13-41. *In* 4èmes Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Septiembre 1988.
- GUYOT J.L., WASSON J.G., SANEJOUAND H., QUINTANILLA J., CALLE H. 1989. Primera evaluación del impacto de la ciudad de La Paz sobre el medio amazónico. Evaluación de la físico-química y del carbono orgánico total (COT) a lo largo del Río La Pa-Boopi, 31-38. *In* Simposio sobre la preservación del medio ambiente, La Paz, Octubre 1989.
- GUYOT J.L. BOURGES J., CORTES J., JOUANNEAU J.M., QUINTANILLA J., ROCHE M.A. 1991. Regimes hidroquímicos e dos sedimentos dos rios da bacia amazônica da Bolivia, 149-158. *In* Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Novembro 1991, Publ. ABRH.
- GUYOT J.L., CORBIN D., QUINTANILLA J., CALLE H. 1991. Hydrochimie des lacs dans la région de Trinidad (Amazonie bolivienne). Influence d'un fleuve andin: le Rio Mamoré. Revue d'Hydrobiologie Tropicale 24(1): 3-12.
- ILTIS A. 1988. Datos sobre las lagunas de altura de la región de La Paz (Bolivia). Publ. Orstom, La Paz, N° 14, 50 p.
- MAGAT P. 1981. Première évaluation de la géochimie des eaux dans les vallées de la Cordillère orientale de Bolivie. Publ. Orstom/Umss, Cochabamba, 35 p.
- MEYBECK M. 1983. Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances, 173-192. *In* Dissolved loads of Rivers and Surface Water Quantity/Quality Relationships. Webb W.B. (ed.), Hamburg, August 1983. IAHS Publ. 141.
- MEYBECK M. 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. Bulletin des Sciences Géologiques, 39(1): 3-77.
- PAREJA J., VARGAS C., SUÁREZ R., BALLON R., CARRASCO R., VILLARROEL C. 1978. Mapa geológico de Bolivia, memoria explicativa. Ed. Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos y Servicio Geológico de Bolivia, La Paz, 27 p.
- PILLERI G., GIHR M. 1977. Observations on the Bolivian and the Amazonian Bufo with a description of a new subspecies, 11-76. *In* Investigations on Cetacea, Pilleri G. (ed.), Vol. VII.
- QUINTANILLA J., GEMIO R., CALLICONDE M. MARTINEZ J., WIRRMANN D. 1989. Estudio preliminar de la hidrogeología e hidroquímica de la laguna Santa Rosa. Revista Boliviana de Química, 8(1): 49:56.
- RICHEY J.E., BROCK J.T., NAIMAN R.J., WISSMAR R.C., STALLARD R.F. 1980. Organic Carbon: Oxidation and Transport in the Amazon River. Science 207: 1348-1351.

RICHEY J.E., VITORIA R.L., SALATI E., FOSBERG B.R. 1991. The biogeochemistry of a Major River System: The Amazon Case Study, 57-74. In Biogeochemistry of Major World Rivers, Scope 42, Degens E.T., Kempe s. y Richey J.E. (eds.), J. Willey, Chichester.

ROCHE M.A., FERNANDEZ C., APOTEKER A., ABASTO N., CALLE H., TOLEDE M. CORDIER J.P., POINTILLART C. 1986. Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Publ. Phicab, La Paz, 257 p.

ROCHE M.A., FERNANDEZ C. 1988. Water Resources, Salinity and Salt Yields of the Rivers of the Bolivian Amazon. Journal of Hydrology 101: 305-331.

ROCHE M.A., FERNANDEZ-JAUREGUI C., ALIAGA A., BOURGES J., CORTES C., GUYOT J.L., PEÑA J., ROCHA N. 1991. Water and salt balances of the Bolivian Amazon, 83-94. In Water Management of the Amazon Basin, Braga B.P.F. y fernandez-Jáuregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo.

SCHMIDT G.W. 1972. Seasonal changes in water chemistry of a tropical lake (Lago do Castanho, Amazonia, South America). Verth. Internat. Verein. Limnol. 16: 613-621.

SIOLI H. 1950. das Wasser im amazonasgebiet. Froschungen und Fortschritte 21/22: 274-280.

SIOLI H. 1957. Valores de pH de águas amazônicas. Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi 1: 1-37.

SIOLI H. 1968. Hydrochemistry and Geology in the Brazilian Amazon Region. Amazoniana 1(3): 267-277.

STALLARD R.F., EDMOND J.M. 1981. Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. Journal of Geophysical Research 86(10): 9844-9858.

STALLARD R.F., EDMOND J.M. 1983. Geochemistry of the Amazon. 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. Journal of Geophysical Research 88(14): 9671-9688.

UNGEMACH H. 1972. Die Ionenfracht des Rio Negro, Staat Amazonas, Brasilien, Amazonianan 3(2): 175-185.

WASSON J.G., GUYOT J.L., DEJOUX C., ROCHE M.A. 1989. Régimen térmico de los ríos de Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 35 p.

WILLIAMS P.M. 1968. Organic and Inorganic Constituents of the Amazon River. Nature 218: 937-938.

HIDROLOGIA DE LA CUENCA AMAZONICA BRASILEIRA: HIBAM

PRIMEROS RESULTADOS SOBRE LA CUENCA DEL RIO MADEIRA

*Michel MOLINIER⁽¹⁾, Jean Loup GUYOT⁽¹⁾, Jacques CALLEDE⁽¹⁾
Eurides de OLIVEIRA⁽²⁾, Valdemar GUIMARAES⁽²⁾
Kazimierz Josef CUDO⁽²⁾ y Moacyr C. de AQUINO⁽²⁾*

(1) ORSTOM, CP 09747, 70001-970, Brasilia DF, Brasil.

(2) CTRH/DNAEE, Ministerio de Minas y Energía, 70000 Brasilia DF, Brasil

INTRODUCCION

Para atender las recomendaciones de los seminarios sobre el balance hídrico de América del Sur (La Paz 1987) y, más específicamente, de la región amazónica (Manaus 1988), en el ámbito del proyecto internacional UNESCO/PNUD (RLA-06/86), como responsable, a nivel federal, del Sistema de Informaciones Hidrometeorológicas, la Coordinación General de Recursos Hídricos (CGRH) del Departamento Nacional de Aguas y Energía Eléctrica (DNAEE), presentó, para los países miembros del Tratado de Cooperación de la Amazonia, una propuesta Brasileira (DNAEE 1988) de Balance Hídrico Superficial de la Cuenca Amazónica. Desde 1990, en colaboración con l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en Coopération (ORSTOM), el CGRH inició un programa sobre el Balance Hídrico de la Amazonia con objeto de realizar una evaluación cuantitativa espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica amazónica.

Con el fin de establecer una contabilidad a nivel nacional y continental, el proyecto tomó como base de referencia principal el documento "Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur" (UNESCO-ROSTLAC-1992), y como banco de datos el Micro-Sistema de Datos Hidrometeorológicos del DNAEE (MSDHD) que abarca cerca de 1000 estaciones pluviométricas de las cuales 320 son operadas por el DNAEE, 321 estaciones pluviométricas localizadas en la región amazónica (219 operadas por el DNAEE) y 40 estaciones climatológicas como depósito evaporimétrico pertenecientes al DNMET para la totalidad de la región amazónica brasileira.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la parte brasileira de la cuenca del Río Madeira (1 420 000 km², de los cuales 580 000 km² están en territorio brasileiro - figura 1), donde fue efectuado un estudio detallado, a nivel mensual, de los principales términos del balance hídrico.

METODOLOGIA

Ecuación del balance hídrico

Como se menciona arriba, la metodología elaborada sigue las recomendaciones hechas por la UNESCO en su guía de 1982. La meta es evaluar los principales límites de la ecuación simplificada del Balance Hídrico superficial. Para grandes períodos de tiempo y grandes áreas de drenaje la ecuación tiene la siguiente fórmula:

$$[P] = [LE] + [ETR] + B$$

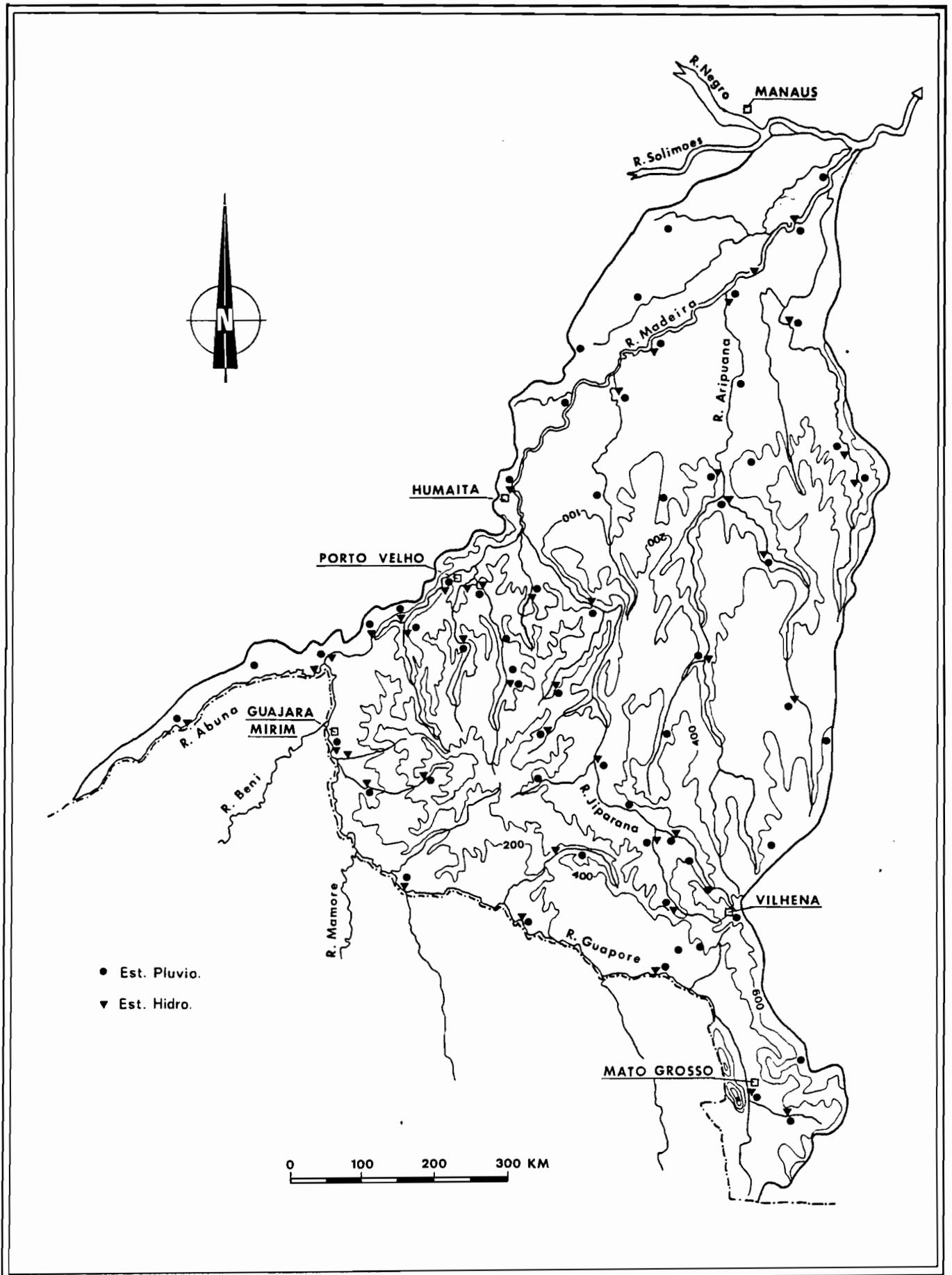


Figura 1 : Cuenca brasileña del río Madeira

- como [P] = Precipitación media del período y del área considerada;
 [LE] = Lámina media escurrida del mismo período y de la misma área;
 [ETR] = Evapotranspiración Real del mismo período y de la misma área;
 B = Término de discrepancia

El símbolo "[]" indica una media espacial horizontal de largo período y la barra "-" la media temporal de largo período. El término (término de discrepancia "B" el término residual que representa el error de estimación o de medición, permite comparar los valores calculados del Déficit Hídrico ([P] - [LE]) con una Evapotranspiración Real ([ETR]) estimada a partir de las fórmulas empíricas. Los valores bajos de B indican que los términos del balance hídrico tienden a compensarse.

Homogeneización de los datos

Después de analizar los datos hidropluviométricos del Banco de Datos del microsistema MSDHD del DNAEE, la consistencia fue hecha a través del Método del Vector Regional (MVR) desarrollado en ORSTOM por Hiez (1977).

El "Vector Regional" es una serie cronológica, sintética de índices pluviométricos o fluviométricos anuales o mensuales, procedentes de la extracción, por un método de máxima semejanza, de la información "más probable" contenida en los datos de un conjunto de estaciones de observación, agrupadas por región considerada como homogénea en lo que respecta a pluviometría o a fluviometría.

Esta definición se apoya en dos principios fundamentales:

- en el de la "pseudo-proporcionalidad" de los totales anuales o mensuales entre puestos vecinos. Esto es, debe coincidir entre datos anuales o mensuales en las series agrupadas, independientemente de la abundancia pluviométrica o fluviométrica;
- la información "más probable" es la que se repite con mayor frecuencia.

Además de estos dos principios, conviene agregar algunas hipótesis complementarias:

- la elaboración del Vector no parte de ninguna hipótesis en cuanto a distribución estadística de datos;
- dentro del agrupamiento regional de estaciones, no debe existir ninguna variación sensible de tendencia climática ("región homogénea");
- cualquier medición hidroclimatológica, por naturaleza puntual en el espacio y en el tiempo, debe estar sujeta a error y, por lo tanto, no debe servir de referencia para rellenar lagunas de otra estación;
- con todo se admite que la información globalmente proporcionada para el conjunto de las estaciones contiene un valor estimativo más representativo que aquel proporcionado aisladamente por cualquiera de las estaciones;
- consecuentemente, toda la información contenida en cada una de las estaciones contribuye en la elaboración del vector, sin que los datos erróneos puedan tener una influencia sensible sobre el resultado.

El método del Vector regional se basaba esencialmente:

- sobre la elección de una estimación del modo, sin tomar en consideración la forma de las funciones de distribución;
- sobre un proceso de extracción del vector de referencia, por interacciones sucesivas sobre las líneas (año o mes) y columnas (puesto pluviométrico) de la matriz de datos.

El producto de este procesamiento es una secuencia de índices representativos de los eventos hidroclimatológicos ocurridos más frecuentemente en la región considerada, abarcando la totalidad del período de observación de un conjunto de puestos.

El gran poder informativo del "Vector Regional" se revela sobre dos aspectos distintos:

- como instrumento de síntesis: ésta constituye un resumen de la crónica hidroclimatológica de cada región homogénea, libre del "ruido" inherente al proceso de adquisición de datos o debido a una anomalía climática localizada en un punto de medición;
- como instrumento de análisis potencial: es el mejor referencial disponible en la crítica de los datos observados, estación por estación.

DATOS DISPONIBLES

Pluviometría

Homogenización

A fin de analizar de manera más completa la pluviometría, fueron reunidos todos los datos de las estaciones pluviométricas de la cuenca del río Madeira, así como de las estaciones más próximas de las cuencas vecinas. Al principio, sólo fueron tomadas en cuenta las estaciones brasileras. Una primera crítica llevó a eliminar algunos puestos con datos insuficientes o dudosos. Así quedaron 140 estaciones, para las cuales fue aplicado el Método del Vector Regional a nivel mensual. La elección de 10 regiones elementales proporcionó 10 vectores regionales. Esta primera homogeneización permitió detectar y (desprezar) otras series dudosas y, entonces, elaborar la tendencia pluviométrica regional de cada zona elemental y, así, agrupar dichas zonas en regiones homogéneas de superficie mayor. Al final sólo se conservaron 47 estaciones pluviométricas para la parte brasileras de la cuenca. Gracias a los datos proporcionados por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) de Bolivia, el número total de puestos considerados como de buena calidad es de 65.

Finalmente, la cuenca fue cubierta con tres vectores regionales representando las tendencias pluviométricas de cada gran zona de la región estudiada.

Período de estudio

El período de homogeneización varía en función de las series observadas. Así, desde la frontera Brasil-Bolivia hasta el Río Amazonas fue posible generar vectores con un período continuo, sin lagunas, desde 1943 hasta 1988. De este modo, las series mensuales y anuales de cada estación de esas regiones, son completas para estos 46 años. Lamentablemente, no fue posible conseguir series con el mismo período para otras zonas de la región estudiada. En realidad, el límite fue definido por los datos pluviométricos. En efecto, siendo la meta de este trabajo calcular los componentes del balance hídrico, es imprescindible que el período de estudio sea el mismo para cada uno de los componentes. Como se expone en el párrafo a seguir (Esguerramiento), el mayor período común de homogeneización para la pluviometría fue de 15 años (1973-1987). Consecuentemente, el mismo período fue observado para la pluviometría.

Trazado de las isoyetas

Los resultados obtenidos son utilizados para calcular la pluviometría media mensual y anual de cada cuenca y subcuenca por el método de los polígonos de Thiessen y para trazar las curvas isohietas. La figura 2 presenta la isohietas anuales obtenidas para el período 1973-1987. En la parte brasileras de la cuenca, la pluviometría anual es gradualmente creciente en el sentido sur-norte.

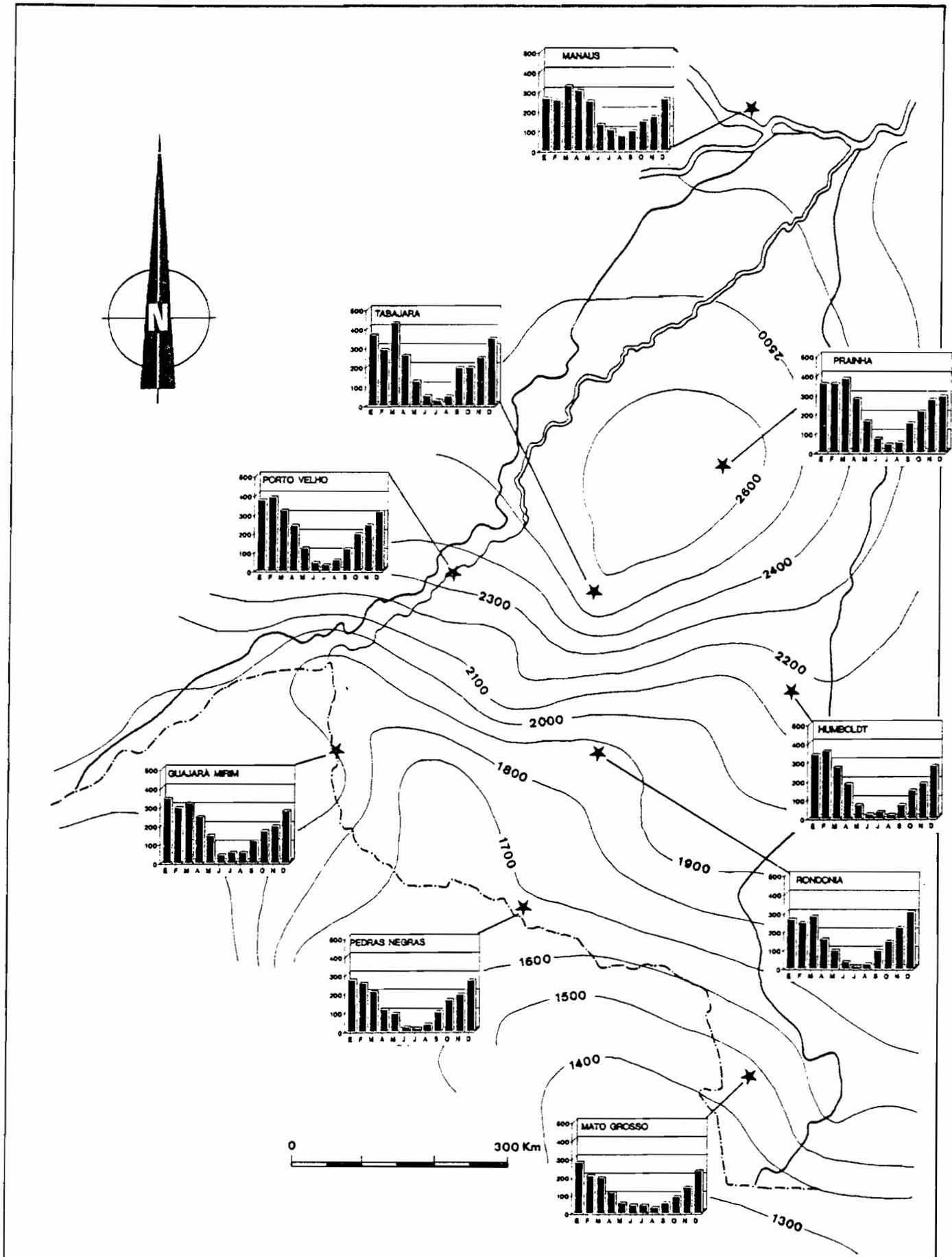


Figura 2 : Pluviometria média anual de la cuenca brasileña del rio Madeira

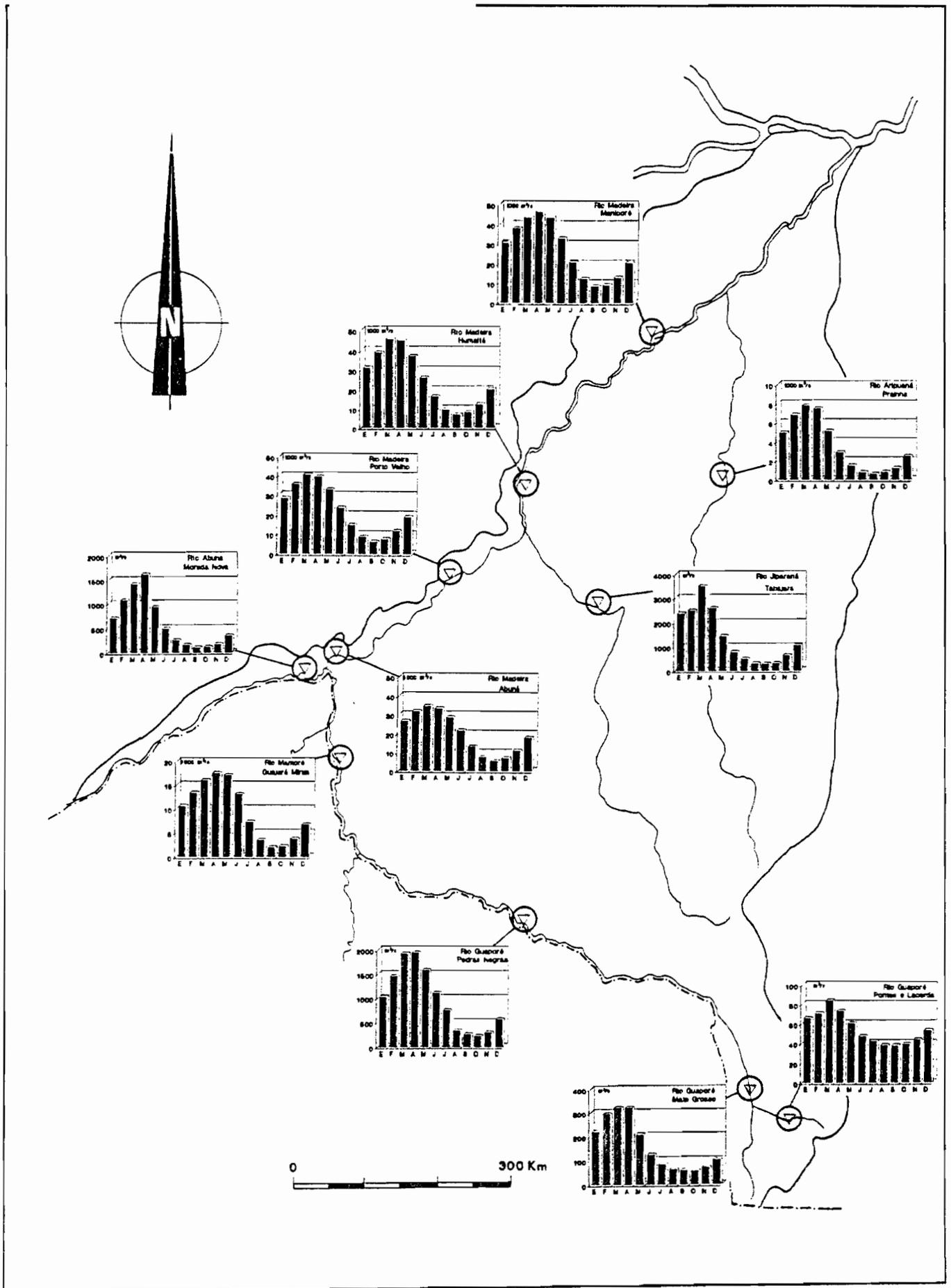


Figura 3 : Régimen hidrológico de la cuenca brasileña del rio Madeira

Escurrimiento

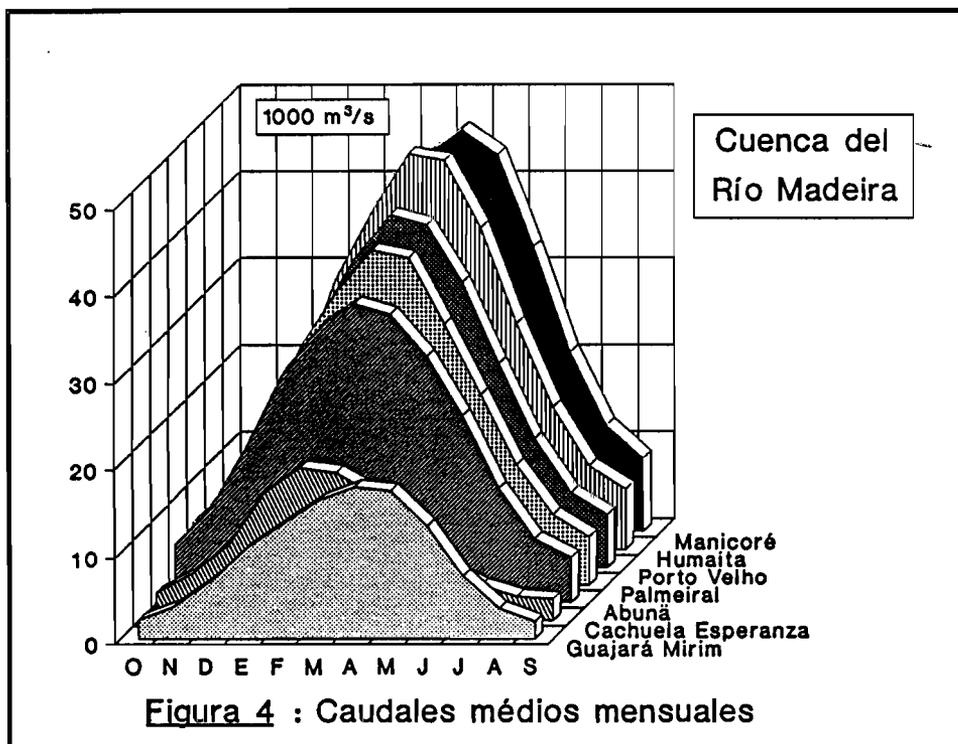
Homogeneización

El análisis del escurrimiento de las cuencas fue realizado de manera idéntica al de la pluviometría. Evidentemente, sólo fueron tomadas en cuenta las estaciones con observaciones limnimétricas y mediciones de descargas, y con una curva de calibración de buena calidad. El total de estaciones fluviométricas correspondiendo a este criterio fue de 27.

Un primer procesamiento del Vector Regional fluviométrico a nivel mensual sobre las láminas escurridas permitió generar 3 vectores, uno aguas arriba, uno aguas abajo y uno intermedio y, así, descartar tres estaciones dudosas o sin datos suficientes. Al final quedaron 24. El área de drenaje de las otras estaciones varía entre 946 km² (río Pacaas Novas en Seringal Sao Luiz) y 1 124 000 km² (río Madeira en Manicoré).

Pluviometría medida por subcuenca

La pluviometría media de cada una de las 24 subcuencas fue calculada por el método de los polígonos de Thiessen, utilizando los resultados obtenidos durante el procesamiento de la pluviometría sobre los 65 puestos. El resultado final es una tabla de 4320 valores mensuales para los 15 años y las 24 estaciones. Este cuadro, junto con el cuadro de la fluviometría, fueron utilizados para calcular el déficit medio mensual de cada subcuenca como se presenta más abajo en el párrafo 5.



Regimen hidrológico

El régimen hidrológico del río Madeira parece bastante homogéneo en su parte brasilera (figura 3), desde la frontera con Bolivia hasta su confluencia con el río Amazonas. La influencia de los Andes y de las grandes zonas de inundación cruzadas por sus tributarios en Bolivia es predominantemente en la composición del régimen hidrológico en territorio brasilero. De Abuna (900 000 km²) a Humaitá (1 066 000 km²) el mes con el escurrimiento más importante es el mes de marzo (figura 4). En Abuna el régimen del río Madeira es el resultado de los regímenes del río Beni (máximo en

febrero) (Bourges, 87; Bourges et al., 87) y del río Mamoré (máximo en abril). En Manicoré, el mes más abundante es el mes de abril debido al tiempo de propagación de la crecida anual y a causa de la gran extensión de las zonas de inundación (Roche y Fernández, 82).

BALANCE HIDRICO

Como ya fue mencionado arriba, la evaluación de los términos del balance hídrico superficial de algunas estaciones de la cuenca del río Madeira (cuadro 1 y figura 5) fue efectuada en 15 años (1973-1987) de acuerdo con la ecuación [1]. Con este período, el déficit hídrico medio anual (**Déf**) puede ser asimilado a la evapotranspiración real (**ETR**). En la totalidad de la cuenca el escurrimiento medio anual es de 693 mm ($31\,200\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$) (Molinier, 92), con una pluviometría media anual de 1 820 mm se puede estimar la evapotranspiración real a 1 127 mm. En lo que respecta a la parte brasilera de esta cuenca ($580\,000\text{ km}^2$) el escurrimiento es del mismo orden (700 mm o sea $12\,870\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$), pero con un valor de la pluviometría medio anual más elevado, que proporciona un déficit hídrico (o evapotranspiración real) de 1 350 mm. Dicho valor corresponde al valor de la ETR (1 368 mm) calculada para la cuenca vecina del río Purus (Molinier et al., 1991) cuya casi totalidad de superficie ($370\,000\text{ km}^2$) está situada dentro del territorio brasilero.

Cuadro 1: Balance Hídrico de la cuenca del Río Madeira

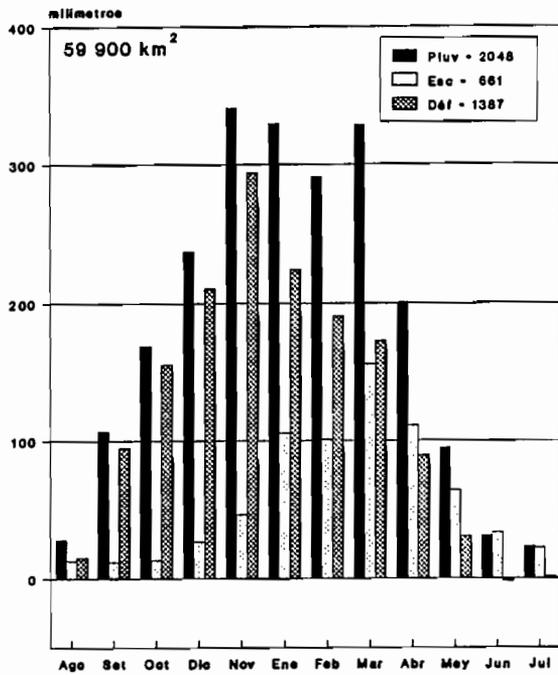
Río	Estación	Area de drenaje (km ²)	Pluviometría media (mm)	Escurrimiento medio (mm)	Déficit hídrico (mm)	Coef. de escurrimiento (%)
Guaporé	Mato Grosso	18 400	1 482	225	1 257	15
Guaporé	Pedras Negras	109 800	1 544	254	1 290	16
Mamoré	Guajará Mirim	589 500	1 410	463	947	32
Madeira	Abunã	900 000	1 566	659	907	42
Madeira	Palmeiral	936 800	1580	667	913	42
Madeira	Porto Velho	954 300	1 589	685	904	43
Jiparaná	Tabajara	59 900	2 048	661	1 387	32
Aripuanã	Prainha	108 600	2 131	1 010	1 121	47
Madeira	Humaitá	1 066 000	1 653	680	973	41
Madeira	Manicoré	1 124 000	1 696	692	1 004	40
Madeira	Confluência	1 420 000	1 820	693	1 127	38
Madeira	Brasil	580 000	2 050	700	1 350	34

Una primera tentativa de regionalización de las descargas efectuadas con los datos de la cuenca del río Madeira junto con los resultados obtenidos en la cuenca del río Purus, sobre una muestra de 49 valores de caudales medios anuales, evidenciaron el papel predominante del área de drenaje de la cuenca. Como efecto, en esta región, donde la repartición de la pluviometría es relativamente homogénea y varía poco tanto en el espacio como en el tiempo, es evidente que el factor principal de la variabilidad de la producción de los puntos representativos de los pares - área de drenaje / caudales media anual - en relación a la curva de regresión, mostró que ésta está muy bien correlacionada con la pluviometría anual. Después de varias tentativas fue establecida una relación entre el área de drenaje (**A**) en km², la pluviometría media anual (**P**) en mm y el caudal medio anual (**Q**) en m³ s⁻¹ cuya fórmula es la siguiente:

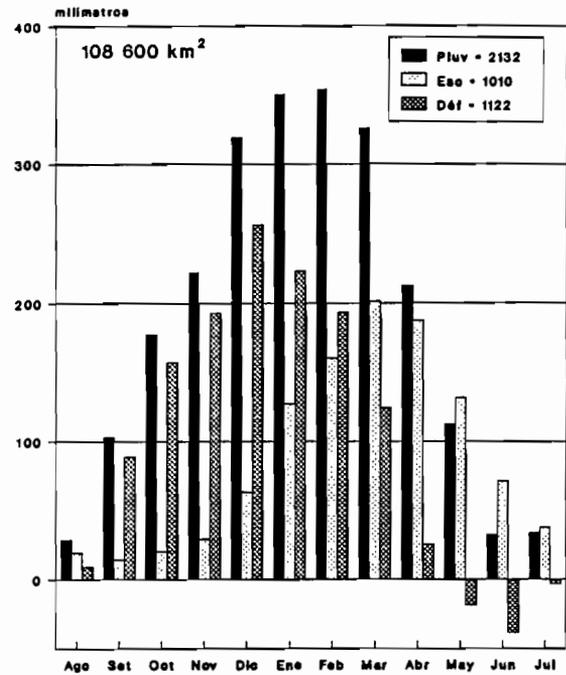
$$Q = A / 259,5 * e^{P/1133} \quad [2]$$

Este resultado aún es provisorio y no permite llegar a una conclusión definitiva. Es necesario esperar la inclusión de otras subcuencas de la región para mejorar esta

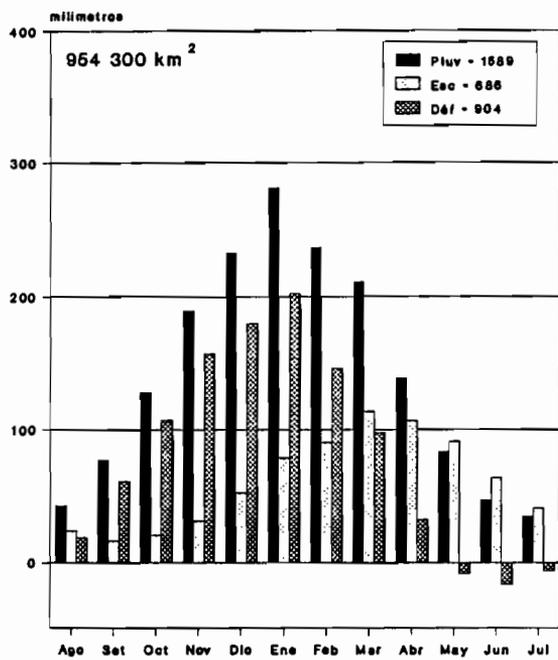
Río Jiparaná en Tabajara



Río Aripuaná en Prainha



Río Madeira en Porto Velho



Río Madeira en Manicoré

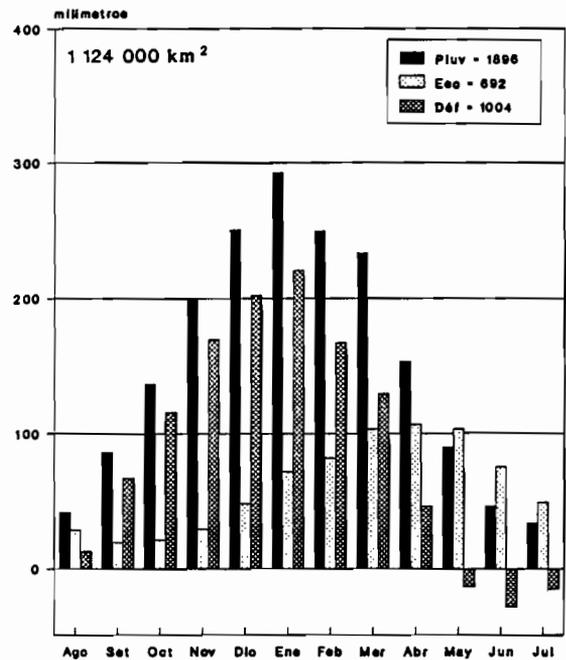


Figura 5 : Balance hídrico de la cuenca brasileña del río Madeira

relación. Aparte de esto, sería bueno probar la relación a nivel mensual, tal vez tomando en cuenta la pluviometría de los meses anteriores, para caracterizar el estado de humedad previa del suelo, o el abastecimiento en de agua en las primeras capas del suelo. Un test de simulación, efectuado en las estaciones intermedias del río Purus, dió resultados promisorios.

CONCLUSION

Los resultados obtenidos en esta cuenca del Río Madeira, junto con los de la cuenca del Río Purus, constituyen la primera etapa de un proyecto más amplio que está siendo desarrollado en el DNAEE en cooperación con el ORSTOM para la totalidad de la cuenca amazónica brasilera. Dichos resultados permitirán establecer relaciones entre el escurrimiento, la pluviometría y el área de drenaje de 47 subcuencas de las cuales ríos y, así comenzar una primera regionalización, a nivel anual, de la pluviometría, la fluviometría y, luego, del déficit hídrico, término que puede asimilar la evapotranspiración real cuando se trata de largos períodos de tiempo y grandes áreas de drenaje.

Se prevee proseguir con este trabajo en los dos próximos años para alcanzar la totalidad de la cuenca amazónica brasilera. Además de proporcionar valores confiables de los principales componentes del balance hídrico superficial, los resultados permitirán establecer una estimación cuantitativa espacial y temporal de los recursos hídricos, para caracterizar mejor el régimen hidrológico de la región Amazónica, propiciando así, un uso más racional de estos recursos. Uno de los resultados esperados es la evaluación de la degradación antrópica de la vegetación amazónica a través de las variaciones de los regímenes hidrológicos de cada una de las subcuencas durante los veinte últimos años.

BIBLIOGRAFIA

- BOURGES, J., (1987), *Projet de Cachuela Esperanza. Etude sommaire des apports*. Publ. PHICAB, La Paz, 20 pp.
- BOURGES, J., CORTES, J., HOORELBECKE, R., (1987), *Etude des débits du Rio Mamoré à Guayaramerin*. Publ. PHICAB, La Paz, 26 pp.
- DNAEE, (1988), *Balço hídrico superficial da bacia amazônica. Proposta brasileira. 2a versao*. Brasília-DF, DNAEE, DCRH.
- HIEZ, G., (1977), *L'homogénéité des données pluviométriques*. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, Paris, V. 14, n.2, p. 129-172.
- HIEZ, G., TELLES, C. (1983), *SIH Sistema de Informação Hidrometeorológica. Subsistema de modelos matemáticos. Modelo do Vetor Regional*. Brasília, DNAEE, DCRH.
- MOLINIER, M., MAIA, A.C. da S., SANTOS, D. dos, (1991), *Balço hídrico da bacia amazônica - Metodologia e primeiros resultados*. IX Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 10-14 de novembro 1991, vol. 1, pp 158-167.
- MOLINER, M. (1992), *Régionalisation des débits du bassin amazonien: Premier résultats*. VII Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 22-23 septembre 1992.
- PENMAN, H.L., (1956), *Estimating evaporation*. Trans. Americ. Geophysic Union. V. 37, n.1, p. 43-50.
- ROCHE, M.A., FERNANDEZ, C., (1988), *Water Resources Salinity and Salt Yields of the Rivers of the Bolivian Amazon*. Journal of Hydrology, 101: 305-331.
- THORNTHWAITE, C.W., (1954), *The mesurement of potential evapotranspiration*. John P. Mather Seabrook, New Jersey.
- THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.P., (1955), *The water balance. Laboratory of Climatology*. Publ. n.8, Criterin, N.J.
- TURC, L. (1955), *Le bilan d'eau des sols: relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Institut National de Recherche Agronomique. Laboratoire des sols. Versailles.
- UNESCO-ROSTLAC, (1982), *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Estudios e informes en hidrología. Montevideo.
- UNESCO-ROSTLAC, (1987), *Taller sobre el balance hídrico de América del Sur. Informe Final*. La Paz, Bolivia.

DESPUES DEL PHICAB

UN NUEVO PROYECTO HIDROLOGICO CON ORSTOM

Pierre RIBSTEIN⁽¹⁾, *Robert HOORELBEKE*⁽¹⁾, *Eric TIRLAU*⁽¹⁾
Edgar SALAS R.⁽²⁾, *Jose CORTEZ M.*⁽³⁾

(1) ORSTOM, C.P. 9214, La Paz, Bolivia

(2) IHH, C.P. 699, La Paz, Bolivia

(3) SENAMHI, C.P. 10993, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

En este artículo se presenta el nuevo proyecto que, para los hidrólogos de ORSTOM, viene a continuación del programa PHICAB. Se trata del programa PECA (Precipitaciones y Escurrimientos de Cuencas Andinas). Es un programa desarrollado con los mismos asociados principales que el programa PHICAB, es decir el IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología de la UMSA), el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) y ORSTOM (Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación).

PECA es un programa de investigación complementario del PHICAB que se desarrollará en torno a tres prioridades:

- * *un objetivo*, la comprensión y la representación de los procesos vinculados al escurrimiento y al transporte de materias;
- * *una zona de estudio*, los Andes y el Altiplano, río arriba de la cuenca amazónica estudiada en el marco del PHICAB;
- * *una herramienta de análisis*, la modelización hidrológica, único medio para extrapolar los resultados en el tiempo y en el espacio.

Como zona de estudio fue elegida, para empezar, la región de La Paz. Se trata, en efecto, de la zona más poblada de los Andes de Bolivia, y también se trata de una región que tiene problemas de agua: lluvias devastadoras, fuertes crecidas en terrenos con gran tendencia a la erosión y, finalmente, dificultades de alimentación en agua potable durante la estación seca. Las tres etapas más importantes del ciclo del agua en la zona elegida son estudiadas en el programa PECA:

- * *las precipitaciones*. El tema a abordar concierne a la influencia del relieve sobre las precipitaciones;
- * *los escurrimientos y el transporte de sedimentos*. Se trata de analizar el devenir de las precipitaciones, la parte de las lluvias que se infiltra y la relación entre aguacero, crecidas y transporte de sedimentos en zonas de mucho declive;
- * *la hidrología de un glaciar tropical*. Esta parte del programa debe permitir conocer los diferentes parámetros que explican el balance hidrológico de un glaciar tropical en Bolivia.

Los párrafos siguientes presentan en detalle las tres partes del programa PECA, pero antes insistiremos sobre el tema general, común a estas tres partes: la hidrología de altas montañas tropicales. Es un tema poco abordado en la literatura hidrológica y, sin embargo, es un tema importante; los resultados del PHICAB (Roche *et al.*, 1992; Guyot, 1992) mostraron que la explicación de los fenómenos observados en el llano amazónico debe buscarse en la hidrología de las cuencas andinas.

Se trata de una investigación que puede catalogarse básica, sin embargo el programa PECA debería también aportar importantes resultados interesantes para el desarrollo de la región. Un mejor conocimiento de la hidrología en la región de La Paz conducirá a una mejor administración y abastecimiento del agua en la ciudad.

LAS PRECIPITACIONES EN ZONA DE MONTAÑA

Los fenómenos meteorológicos que rigen a las precipitaciones sobre los Andes son bastante conocidos (Johnson, 1976; Ronchail, 1986). En cambio, pocos estudios se han referido a la variabilidad espacial y a la evolución temporal de los eventos de lluvias, trabajando en pequeñas escalas de tiempo y de espacio.

A partir de datos de la cuenca del río La Paz, incluyendo la ciudad de La Paz, el estudio realizado trata del régimen de las lluvias y su variabilidad. Esta cuenca, de una superficie de alrededor de 500 km² en puente de Aranjuez (ver figura 1), está equipada de una treintena de estaciones pluviométricas y varias estaciones pluviográficas. En el marco de PECA, un primer trabajo consistió en crear el banco pluviométrico y pluviográfico de datos, gracias al paquete PLUVIOM del ORSTOM. Una vez captados y analizados los datos, el estudio concierne a los parámetros estadísticos del régimen de las lluvias utilizando sobre todo los datos de las estaciones más largas, como la del observatorio San Calixto (Segaline Nieto y Cabre, 1988) que posee mas de 75 años de datos pluviométricos y 35 años de datos pluviográficos. Los resultados de esta parte del estudio se presentarán en forma de valores de lluvia y períodos de retorno correspondientes en diferentes intervalos de tiempo. Se debe resaltar por ejemplo que no existe ningún estudio detallado de las curvas intensidad-duración-frecuencia, válidas para los Andes de Bolivia. La búsqueda de tendencias estadísticas sobre las largas series de datos, permitirá estudiar los cambios del clima (relación con el fenómeno "El Niño - Oscilación Sur" o influencia de la urbanización de La Paz sobre el régimen de las lluvias por ejemplo).

Las precipitaciones observadas en los treinta pluviómetros, repartidos en la cuenca de La Paz, permiten estudiar la variabilidad espacial de la lluvia, la influencia de la altura y de la exposición de los valles. Por medio de los instrumentos de la geoestadística (funciones splines, kriging), es posible conocer la distancia de decorrelación de datos de las estaciones pluviométricas, y comparar esta distancia a la variabilidad de parámetros del relieve por ejemplo; la figura 1 ilustra este párrafo mostrando las isoyetas anuales del período 1985-1991 (isoyetas calculadas en años hidrológicos que comienzan en el mes de septiembre). Al norte y al este de la cuenca, no hay suficientes estaciones de observaciones para poder trazar isoyetas. En esta figura se debe observar el trazado de las isoyetas que pone en evidencia el valle del río La Paz.

Al norte de la cuenca del río La Paz se sitúa el valle de Zongo, de dirección sur-norte, mientras que el valle de La Paz está orientado aproximadamente norte-sur. Entre el centro de La Paz y un punto situado en la misma altura en el valle de Zongo, hay alrededor de treinta kilómetros. La comparación de las lluvias en los valles del río Zongo y del río La Paz está representada en la figura 2. Las masas de aire húmedo que vienen de la Amazonia llegan por el norte y suben el valle de Zongo desaguándose, lo que explica lluvias más débiles en lo alto del valle de Zongo que en lo bajo. Estas mismas masas de aire, ya bastante desaguadas, atraviesan la cordillera a cerca de 5000 m de altura, luego bajan el valle del río La Paz. Bajando el valle de La Paz, las masas de aire húmedo continúan desaguándose, lo que explica el gradiente de La Paz opuesto al gradiente de Zongo en la figura 2. Se debe observar que el gradiente entre precipitaciones y altura es bien marcado en el caso del río Zongo, mientras que los valores en el valle del río La Paz están muy dispersos, pero todavía muy inferiores a las lluvias en el valle de Zongo en una misma altura.

Las figuras 1 y 2 dan ejemplos de los resultados esperados del programa PECA para esta parte de estudio de las lluvias. Sólo se trata de resultados preliminares, pues hasta ahora el trabajo se consagró esencialmente a la instalación del banco de datos pluviométricos y pluviógrafos, y a la administración de estos datos.

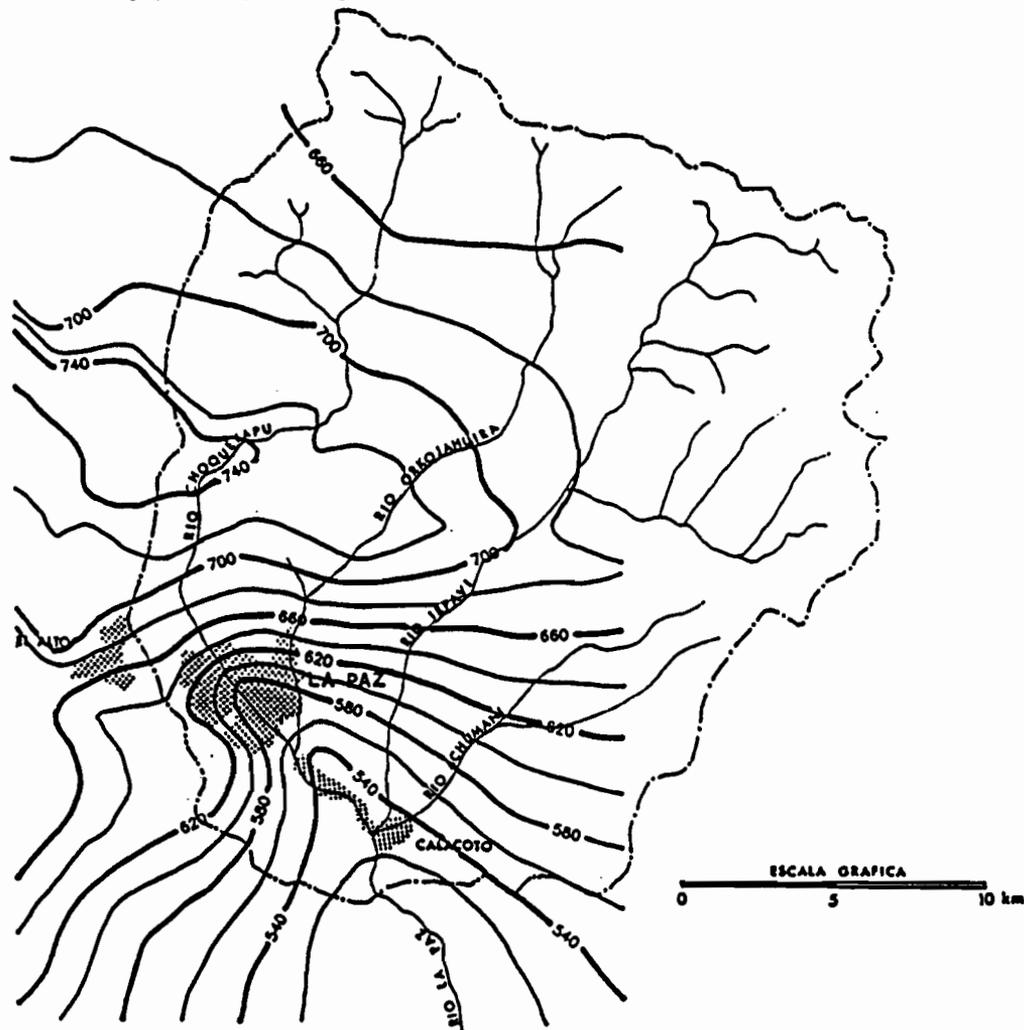


Figura 1: Cuenca del río La Paz en el puente de Aranjuez. Mapa de las isoyetas anuales del período 1985-1991.

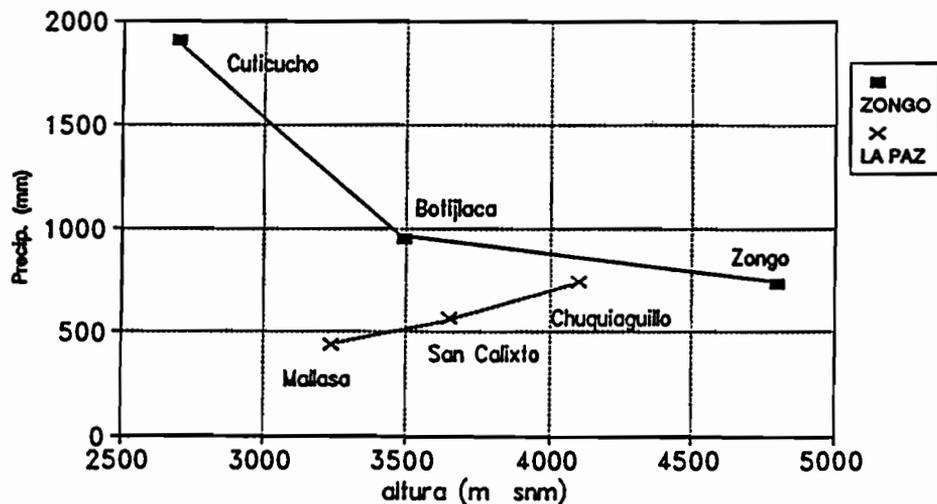


Figura 2: Relación entre las lluvias anuales (1985-1991) y la altura y la orientación de los valles de los ríos La Paz y Zongo

HIDROLOGÍA Y FLUJO DE MATERIA DE PEQUEÑAS CUENCAS

Para comprender la génesis de los escurrimientos y de los flujos de materia en el llano amazónico, los hidrólogos que trabajan en el marco del proyecto PHICAB, comenzaron en 1989 un estudio hidrológico del río Achumani, afluente del río La Paz (Guyot y Bourges, 1989). El río Achumani, que drena los barrios sur de la ciudad de La Paz (ver plan de situación en la figura 1, y mapa de cuenca en la figura 3), fluye por capas sedimentarias del Plio-Cuaternario que proporcionan lo esencial de las materias en suspensión del río Alto-Beni (Guyot, 1992). Este estudio se realiza gracias a la colaboración entre ORSTOM y la Alcaldía de La Paz (DICOMAC, Dirección de Control y Manejo de Cuencas, HAM), y los resultados esperados deben permitir dimensionar mejor las obras de protección contra las inundaciones y estudiar el impacto de las medidas contra la erosión aplicadas a la cuenca (reforestación, algunas presas de contención de sedimentos y canalización de los dos afluentes del río Achumani en una distancia total de 3 km aproximadamente).

En el marco de este estudio, las dos estaciones hidrométricas instaladas controlan cuencas de 17.5 km² y de 38.9 km². Las cuencas estudiadas presentan una influencia antrópica débil, recubiertas de pasto en la parte río arriba y poco cultivadas en el fondo de los valles. La geomorfología de las cuencas fue analizada gracias a un Modelo Numérico de Terreno (MNT), es decir con representación numérica de un campo de alturas conocidas en los nudos de una red regular. El MNT utilizado proviene de la numerización de las curvas de nivel de los mapas topográficos a escala 1/50 000, utilizando el programa DEMIURGE (Depraetere, 1992). Este trabajo ha permitido analizar el mapa de las pendientes de las cuencas: en la gran cuenca, la tercera parte de la superficie presenta una pendiente superior a 36 %, y las pendientes pronunciadas se sitúan en la parte intermedia de la cuenca, entre las vertientes poco inclinadas río arriba y un valle alargado, río abajo (ver Bourges *et al.*, 1992). La figura 4 muestra los resultados provenientes de un archivo derivado del MNT, el de las distancias a la salida. Esta figura representa el perfil longitudinal generalizado de la cuenca, es decir, la relación distancia a la salida-altura de todos los ríos que drenan una superficie superior a 0.18 km². Como en el análisis hecho con el mapa de las pendientes encontramos que: de río arriba a río abajo existe una meseta seguida de una parte intermediaria de pendiente pronunciada para terminar por valles alargados y poco inclinados. Es pues la parte intermediaria la que estará más propensa a la erosión.

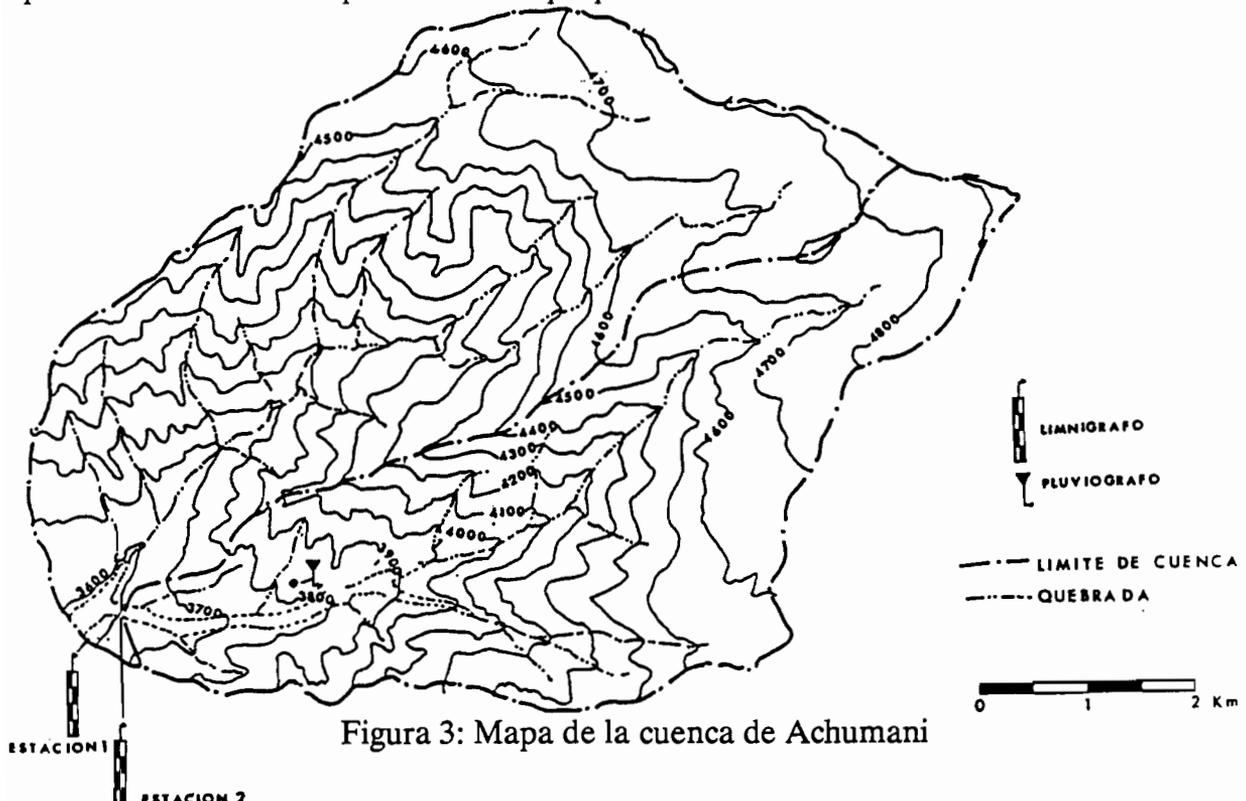


Figura 3: Mapa de la cuenca de Achumani

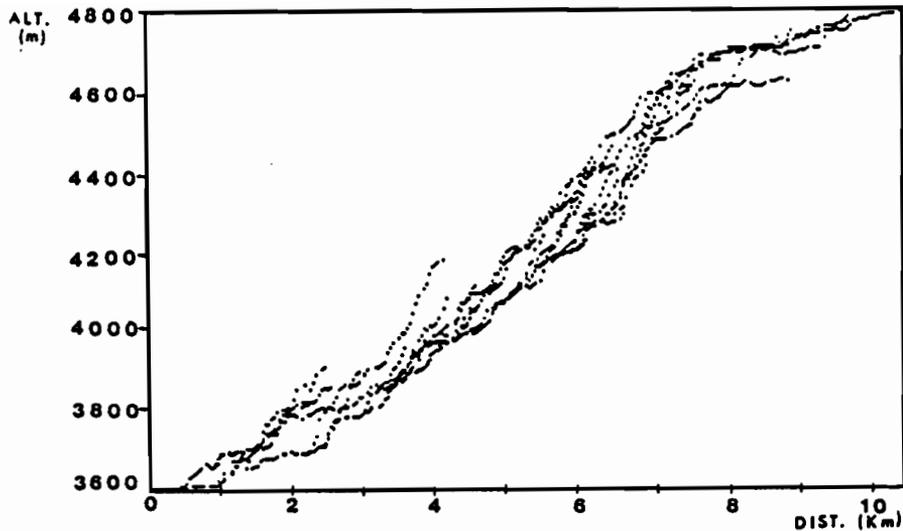


Figura 4: Perfil longitudinal generalizado de la estación 1 de Achumani para superficie drenada superior a 0.18 km²

Los datos desde 1987 del pluviógrafo de la estación de Millipunku fueron comparados a los datos de San Calixto (Bourges *et al.*, 1992). A nivel mensual, la correlación entre las dos estaciones es buena, lo que permitirá extrapolar los datos de Millipunku a partir de la larga serie de San Calixto. Los valores anuales en Millipunku son 12% superiores a los de San Calixto. Un análisis más detallado muestra que esta diferencia viene de un mayor número de días de lluvias, medias a bajas, más que lluvias diarias más fuertes.

Estudiando los datos de los dos años hidrológicos disponibles (1989-1990 y 1990-1991), se observa un escurrimiento semejante en los dos años: 182 y 185 mm en la cuenca de Achumani, 210 y 230 mm en la cuenca Huyllani (Bourges *et al.*, 1992). La repartición anual del escurrimiento refleja la irregularidad del régimen de las lluvias. Tomando como referencia las lluvias de la estación de Millipunku, los coeficientes de escurrimiento varían entre 28% y 38% de un año hidrológico al otro y de una cuenca a la otra. A nivel mensual, los coeficientes de escurrimiento varían de 20% a 60% en los meses más lluviosos. La figura 5 representa las láminas mensuales escurridas en función de las lluvias mensuales observadas en Millipunku. Debajo de 30 mm, no hay escurrimiento superficial. Encima de éste límite, el escurrimiento representa en promedio 60% de la lluvia (inclinación de la derecha en la figura 5). Los valores debajo de la recta muestran meses con suelo más bien seco, mientras que los valores encima muestran los meses con suelo saturado por las lluvias anteriores.

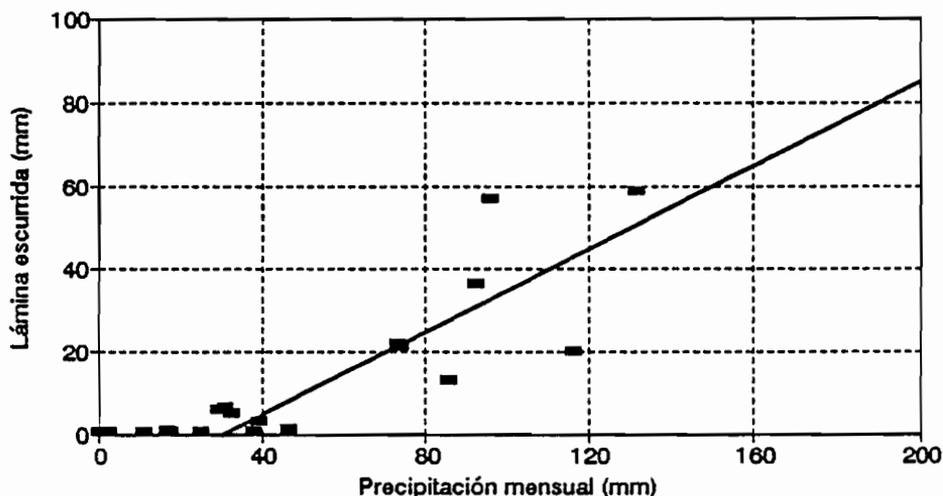


Figura 5: Relación precipitación-lámina escurrida a nivel mensual de la cuenca de Achumani (38.9 km²) - según Bourges *et al.*, 1992 -

Dado el relieve de la cuenca y la irregularidad de las lluvias, las crecidas son rápidas y frecuentemente complejas. Por ejemplo, en febrero de 1990, 32 picos de crecidas superiores a 5000 l.s^{-1} , reagrupadas en 19 días, fueron observadas en la cuenca principal. El caudal máximo observado en la gran cuenca es de 8300 l.s^{-1} (río Achumani) y de 6650 l.s^{-1} en la pequeña cuenca (río Huayllani) (caudales específicos respectivamente de 210 y $380 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$). En este estudio, estas diferentes características de lluvias y de escurrimiento serán correlacionadas a los flujos de materia y a la erosión en las cuencas. Las materias en suspensión presentan concentraciones importantes en el río Achumani, alcanzando $5300 \text{ t.km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ (Guyot, 1992). Uno de los objetivos del estudio de la cuenca piloto de Achumani es poner a punto un modelo lluvia-caudal-flujo de materias adaptado a las condiciones particulares de la hidrología de los Andes.

BALANCE HIDROLOGICO DE UN GLACIAR TROPICAL

Considerando que existen pocos estudios hidrológicos de glaciares tropicales, que estos glaciares presentan un retroceso significativo y que los glaciares de la región de La Paz son importantes para la dotación de agua potable a la ciudad, se comprende el interés de un programa de investigación sobre la hidrología de un glaciar del Huayna Potosí (Francou *et al.*, 1992). El trabajo se realiza en colaboración con glaciólogos del CNRS (Francia) y gracias al apoyo logístico de la COBEE (Compañía Boliviana de Energía Eléctrica S.A.). Este estudio complementa los trabajos realizados en el marco del PHICAB y permite precisar el rol de las aguas de los glaciares en el balance hidrológico de las altas cuencas en un dominio de alta montaña tropical.

Para comprender el retroceso de los glaciares tropicales, se deben conocer primero los parámetros explicativos del balance hidrológico de este tipo de glaciar. Un glaciar es considerado como un sistema cuya señal de entrada viene del clima (precipitaciones, temperaturas, radiación) y cuya señal de salida consiste en una variación del volumen de hielo (avance o retroceso del frente) y en una variación del caudal del río (Francou *et al.*, 1992). El glaciar puede dividirse en dos zonas, una de acumulación en la cual la alimentación por las precipitaciones sólidas es dominante, y una zona de ablación en la cual las pérdidas dominan (evaporación, sublimación y derretimiento). Entre las dos zonas, se sitúa la línea de equilibrio (ELA: Equilibrium Line Altitude, en inglés). Para el Huayna Potosí, esta línea está aproximadamente a 5300 m . La zona de acumulación es estudiada por medio de pozos para encontrar la estratificación natural del nevado; la medida del espesor y de la densidad de cada estrato permite evaluar la cantidad, en equivalente-agua, que se acumuló cada año. En la zona de ablación, las medidas se hacen por medio de balizas plantadas en el glaciar, repartidas entre 5200 y 4900 m de altura. El escurrimiento es medido gracias a dos estaciones hidrométricas equipadas de vertederos, una de ellas con un limnógrafo. En la Plataforma de Zongo (4750 m de altura) un termógrafo y un pluviómetro diario proporcionan datos complementarios. La figura 6 presenta diferentes equipos instalados en el glaciar. El equipo meteorológico debería ser complementado desde el año hidrológico 1992-1993 por un segundo termógrafo (para evaluar los gradientes de temperatura en función de la altura), un pluviógrafo y un piranómetro para medir una radiación global.

Los equipos hidrológicos fueron instalados en septiembre 1991. Dado que se posee hasta ahora más de un año hidrológico completo, es posible hacer un balance preliminar. El cuadro 1 presenta los valores medidos en año hidrológico (sept. 1991-agosto 1992) de diferentes sensores instalados en el glaciar. Comparando el escurrimiento observado río abajo del frente (1410 mm) con la pluviometría de la Plataforma de Zongo (665 mm), se tiene una idea del retroceso actual de este tipo de glaciares. No obstante, es necesario matizar esta gran diferencia con dos observaciones: por una parte, las precipitaciones son ligeramente superiores en altura (880 mm observadas con pluviómetro totalizador a 4890 m) y, por otra parte, este año fue excepcional (fenómeno "El Niño - Oscilación Sur") con una lluvia anual deficitaria y fuertes temperaturas.

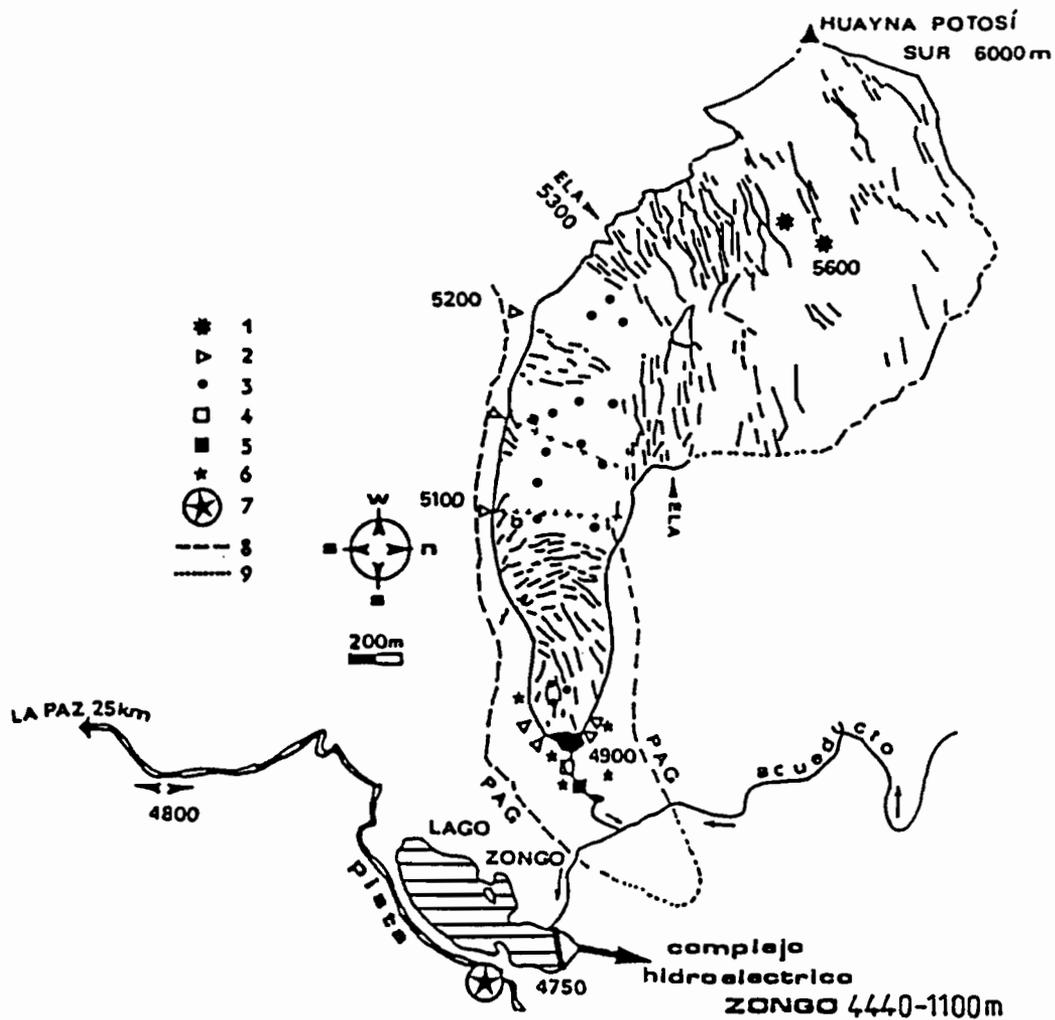


Figura 6: Posición de los diferentes equipos en el glaciar del Zongo.
- según Francou *et al.*, 1992 -

1: sondeos en la zona de acumulación, 2: bases de levantamientos topográficos, 3: balizas de balance-velocidad, 4: estación hidrométrica de Huayna Alto, 5: estación hidrométrica de Huayna Bajo, 6: pluviómetros totalizadores, 7: estación meteorológica de la Plataforma de Zongo, 8: morrena de la Pequeña Edad de Hielo.

Cuadro 1: Balance hidrológico del glaciar del Huayna Potosí desde sept. 1991 hasta agosto 1992 (en mm de agua)

Sensor	Altura	altura de agua
Baliza 4	5120 m	1994 mm
Baliza 15	4910 m	5196 mm
Lámina escurrida	4835 m	1410 mm
Precipitaciones	4750 m	665 mm

Un primer estudio del régimen hidrológico de las aguas del glaciar fue llevado a cabo para el año hidrológico 1991-1992 (figura 7). El escurrimiento mensual observado es bimodal, con un fuerte pico en diciembre y un segundo pico más débil en marzo. Varias observaciones pueden hacerse al ver este gráfico:

- * el escurrimiento es más importante en estación húmeda que en estación seca, debido a temperaturas medias y valores de radiación solar en el límite de la atmósfera más importantes, como se puede ver en la figura 7.
- * el escurrimiento de diciembre, más importante que el de marzo, se explica por la radiación y no por las temperaturas medias que están próximas en estos dos meses.
- * durante la estación de lluvias, los escurrimientos son más escasos en los dos meses más lluviosos (enero y febrero);

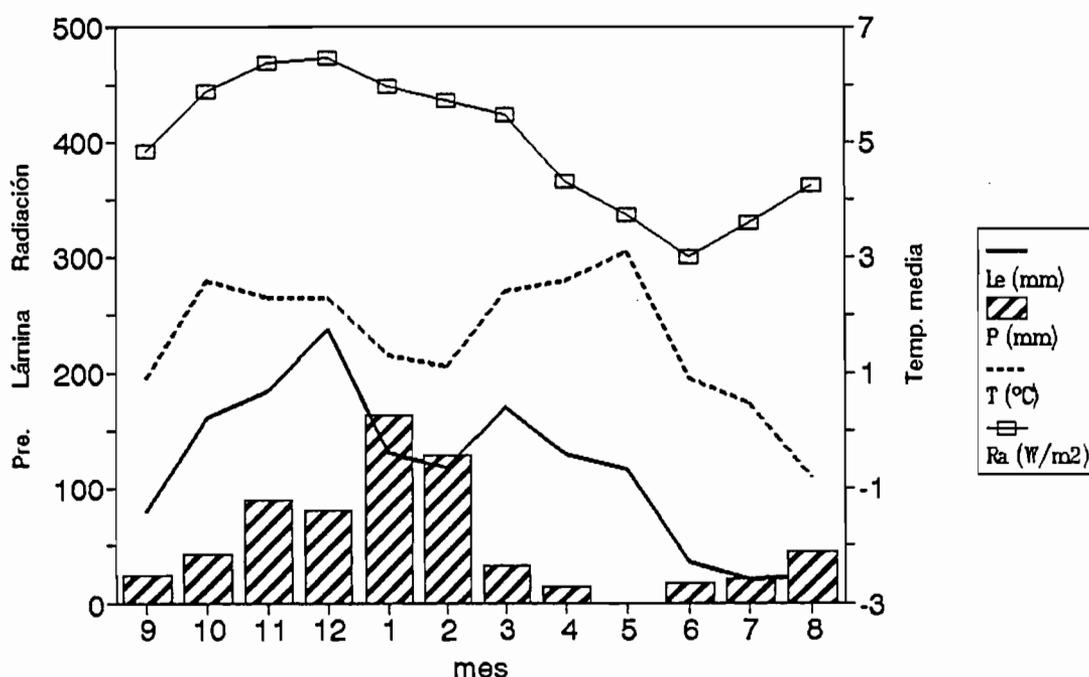


Figura 7: Régimen hidrológico de las aguas de deshielo del glaciar de Zongo 1991-1992

Le altura escurrida en mm, P precipitación en mm a la plataforma de Zongo,
T temperatura media mensual en grados
y Ra radiación en el límite de la atmósfera en $W \cdot m^{-2}$.

Sólo se trata aquí de resultados preliminares. El trabajo se desarrolla actualmente en torno a dos temas:

- * precisar los parámetros explicativos del escurrimiento a nivel diario, gracias a los datos obtenidos por el equipo meteorológico complementario que va a ser instalado;
- * definir mejor el retroceso del glaciar, extrapolando las observaciones en el tiempo con series largas de medidas: temperaturas y precipitaciones en La Paz, niveles de agua en el valle de Zongo, ...

Los resultados obtenidos serán confrontados luego a las medidas de otras cuencas próximas del Huayna Potosí, desde cuencas con superficies de importante porcentaje de hielo hasta cuencas completamente lluviosas. Además, será puesta a punto una modelización hidrológica para predeterminar el escurrimiento de un glaciar tropical a partir de los parámetros explicativos del balance, obtenidos durante este estudio.

CONCLUSION

El programa de investigación PECA presenta en este artículo un programa ambicioso: se trata de comprender y representar las tres partes más importantes del ciclo del agua (precipitaciones, escurrimiento y flujo de materia, hidrología de un glaciar) en los Andes y el Altiplano. Para alcanzar este objetivo, fue elegida una zona test: la región de La Paz y, para cada parte estudiada, fue seleccionada una cuenca. Debido al campo geográfico del estudio (Andes-Altiplano) y por la escala de trabajo (cuencas piloto, pequeños intervalos de tiempo de trabajo), el estudio, desarrollado en el marco de PECA, es complementario a los trabajos realizados por el PHICAB.

El medio estudiado es particular debido a la altura (entre 3200 m y más de 6000 m), al relieve escarpado (inclinación frecuentemente superior a 36 %) y a las características del clima bajo estas latitudes. Un mejor conocimiento de este medio, así como también un análisis de la relación clima-hidrología, son los dos objetivos apuntados por el PECA, objetivos que hay que ubicar en el marco más amplio de los cambios globales del clima.

REFERENCIAS

BOURGES J., RIBSTEIN P., DIETZE C., HOORELBEKE R., CORTEZ J. (1992). Precipitaciones y escurrimiento de una pequeña cuenca en zona de montaña: el río Achumani (La Paz - Bolivia). *In* Los recursos hídricos en Bolivia y su dimensión ambiental, AGID Geoscience, 20: 303-312.

DEPRAETERE C. (1992). DEMIURGE 2.0, Chaîne de production et de traitement de modèles numériques de terrain. Col. Logorstom, ORSTOM (ed.), 197 p.

FRANCOU B., BOURGES J., RIBSTEIN P. VARGAS R. (1992). Un programa de estudio de un glaciar tropical. Aplicaciones en los recursos en agua de una cuenca andina. Informe n° 29, ORSTOM, Bolivia, 32 p.

GUYOT J.L. (1992). Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de Doctorat, Géologie-Géochimie, Université de Bordeaux I, 362 p.

GUYOT J.L., BOURGES J. (1989). Projet d'étude du bassin versant d'Achumani, La Paz, Bolivie. Publ. PHICAB, La Paz, 12 p.

JOHNSON A.M. (1976). The climate of Peru, Bolivia, and Ecuador. *In* World Survey of Climatology, vol. 12, H.E. Landsberg (ed.), Elsevier, Amsterdam, 147-218.

ROCHE M.A., Fernandez-Jáuregui C., Aliaga A., Peña J., Salas E., Montaña J.L. (1992). Balance hídrico superficial de Bolivia. Publ. PHICAB, La Paz, 29 p.

RONCHAIL J. (1986). Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie. Publ. PHICAB, La Paz, 43 p.

SEGALINE NIETO H., Cabre R. (1988). El clima de La Paz. Datos del Observatorio San Calixto. 80 p.

LA GESTION DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN BOLIVIA

"Estamos en capacidad de realizar una gestión integrada?"

Axel C. DOUROJEANT⁽¹⁾, Edgar SALAS R.⁽²⁾

(1) CEPAL, CP 179-D, Santiago, Chile

(2) CONAPHI, CP 699, La Paz, Bolivia

INTRODUCCION

La historia reciente de la región (América Latina y el Caribe) muestra que después de la gran fiebre de los años setenta por la planificación u ordenamiento de los recursos hídricos y la confección de planes nacionales, se sucede una década (la de los 80) en que los gobiernos no pudieron efectuar avances notables en materia de aguas, en gran parte, debido a la crisis económica de esos años.

Hoy, ante la creciente demanda y la cada vez más difícil satisfacción de ésta, la comunidad latinoamericana toda se plantea la necesidad de reformular políticas, en diversos sectores y específicamente en el sector aguas, en orden a mejorar los sistemas de gestión de los recursos hídricos. Es en esta instancia, que el sector hídrico, se vé inmerso en el contexto global del "sector ambiental", en cuanto que el agua es uno más de los recursos naturales con que cuenta el hombre, y como tal es parte de un "ecosistema". Es por esta razón que en muchos foros, reuniones, etc. sobre medio ambiente, se escuchan mociones con referencia al recurso agua y en general una enorme cantidad de expresiones de inconformidad frente a las situaciones existentes; pero pocas soluciones viables.

Uno de los caminos hacia el desarrollo sostenible (entiéndase aquél que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades) es sin duda la "gestión integral" de los recursos. Lo "INTEGRAL" en materia ambiental es imprescindible, pero esta integralidad será alcanzada en la medida que se realicen acciones concretas comenzando por la gestión de cada recurso natural. Esá claro que si no se es capaz de manejar adecuadamente tan sólo uno de los recursos naturales con que cuenta un país, por sobre todo el agua, obviamte no se es capaz de manejar el medio ambiente en forma "integral". En muchos casos, la temática ambiental en lugar de reforzar la capacidad de gestión del agua parece haberla diluído. Vemos con frecuencia, que "se busca manejar el ambiente en forma global sin aún haber demostrado ni siquiera la capacidad de manejar bien uno sólo de los recursos naturales a la escala necesaria". Por el contrario, es fácil darse cuenta, que si se logra manejar el agua en forma apropiada se estaría en mejor situación para manejar el entorno como un todo.

En casi todos los países de América Latina, también en el nuestro, se han identificado numerosos problemas ligados al campo ambiental ("Qué camino debemos andar..", Plan de Acción Ambiental de Bolivia, SENMA), destacando la destrucción ambiental y la falta de equidad. Las enumeraciones, sin embargo, no son suficientes para superar los problemas. Para hacerlo es preciso actuar y para ello se debe disponer de sistemas de gestión capaces de modificar la actitud de los actores involucrados en el proceso de uso de un territorio determinado. En este contexto, la gestión de los recursos hídricos ocupa un lugar preponderante. Alex Dourejeani de CEPAL comentaba hace poco "Si se lograra manejar integralmente estos recursos, así como las cuencas de captación y todo lo que influye sobre la calidad y la distribución del agua, lo más probable es que se solucionará por lo menos el 50% de los problemas ambientales existentes".

EL AGUA Y SU RELACION CON LOS SISTEMAS DE GESTION PARA SU USO MULTIPLE

El agua tiene particularidades que le confieren una serie de ventajas y desventajas para su uso por el hombre. Estas particularidades cubren las mismas características que se deben enfrentar para manejar un ecosistema. El agua literalmente se encuentra relacionada con todo lo que ocurre en dichos ámbitos. La adecuada gestión del agua es por eso también la base para una adecuada gestión ambiental. Entre las particularidades del agua se tiene que:

- Es un recurso natural único y escaso, esencial para la vida en la tierra.
- Solo un pequeño porcentaje del agua en la tierra está disponible para las actividades del hombre.
- El conjunto de todas las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas constituye una unidad.
- El funcionamiento de esta unidad a través del ciclo hidrológico lleva consigo factores de incertidumbre, debido a que el agua se presenta en forma irregular en el tiempo y el espacio lo cual complica los procesos de gestión de los sistemas hídricos. El manejo de los extremos con que se presenta el agua se constituye en un factor esencial.
- La actitud del hombre frente al agua no es constante, pues le asigna un alto valor cuando es escaso (en cantidad o calidad) en proporción a las demandas de los usuarios. En cambio, en situaciones de relativa fácil disponibilidad su presencia pasa prácticamente desapercibida por la mayoría de los usuarios bien abastecidos.
- Muchas poblaciones se asientan y se expanden en zonas con limitada disponibilidad natural de agua, como en zonas de alta montaña o en islas con cuencas de captación reducidas, en zonas semidesérticas etc. Como consecuencia pasan a depender de sofisticados y vulnerables sistemas de captación de agua o sufrir la falta del recurso.
- La mayoría de los usuarios se preocupa solo de captar y usar el agua que necesita sin percatarse de los efectos que dicha captación y uso causan en otros usuarios y en el ambiente. Considera al agua como un bien de libre de uso sin preocuparse del efecto que ello sobre el ciclo hidrológico ni de la necesidad de conservar o proteger las fuentes de captación de agua.
- En general, los actores privados o estatales no poseen una organización que refleje la complejidad del control del ciclo hidrológico. Actúan descoordinadamente para administrar sistemas naturales interconectados, ocupan el territorio ignorando los flujos naturales del agua, y no toman decisiones considerando el largo plazo y las futuras generaciones.
- Fenómenos negativos tales como: la erosión laminar; la degradación de la vegetación; la transformación genética de hombres, animales y plantas por consumo de aguas contaminadas; y, el crecimiento de los asentamientos humanos marginales en zonas inundables o sujetas a deslizamientos, pasan desapercibidos hasta que llegan a manifestarse mediante catástrofes.

Por lo anterior, en la gestión del agua importa controlar sobre todo el efecto de los fenómenos y situaciones extremas con que se presenta el recurso. Estas situaciones extremas se presentan sea por escasez o por sobre abundancia de agua, pero también por violentas alteraciones en la calidad del recurso. Este control debe además ser permanente y de amplia cobertura así como servir a un sistema de gestión capaz de solucionar las situaciones conflictivas. Las acciones preventivas deben ir aparejadas con las acciones para salir de situaciones de emergencia.

PROPOSITOS DE LA GESTION DE LOS RECURSOS HIDRICOS

La gestión de los recursos hídricos, con fines de uso múltiple, puede definirse como "el proceso de control que el hombre ejerce sobre el flujo del agua en su cantidad, calidad, lugar y tiempo de ocurrencia, durante el ciclo hidrológico". Dicha **gestión debe orientarse a maximizar en forma equilibrada los beneficios sociales (equidad), económicos (crecimiento económico), y ambientales (sustentabilidad ambiental)** que se puedan obtener con el aprovechamiento del agua así como a controlar los fenómenos y efectos adversos asociados a los usos del agua, con el fin de proteger al hombre y el ambiente que lo sustenta.

Las compatibilización de la oferta con la demanda del agua implica que se pueden realizar dos tipos de acciones complementarias. Unas sobre la oferta (a veces simplemente denominadas gestión del recurso) y las otras sobre las demandas del recurso (conocidas también como gestión del uso o aprovechamiento del agua).

La responsabilidad de la **gestión de la oferta del recurso** se comparte en un país normalmente entre entidades estatales de nivel nacional, regional, departamental, o autoridades de cuencas o sistemas hídricos. La acción del Estado abarca principalmente la formulación de políticas y planes de ordenamiento del uso de las cuencas los cauces y el agua, el estudio de la oferta del agua, la prevención y mitigación de efectos de fenómenos extremos como sequías e inundaciones, el control de la calidad del agua, el control del drenaje urbano y el apoyo a la construcción de obras hidráulicas colectivas.

El Estado también tiene como función otorgar derechos de aprovechamiento del agua, de ocupación de áreas aledañas a los ríos, concesiones mineras, motivar e incentivar acciones de interés colectivo, y en general aplicar las medidas **técnicas y normativas** necesarias para la gestión integral del agua, así como coordinar la acción de los múltiples usuarios.

La responsabilidad de la **gestión del uso** (hidroenergía, riego, agua potable, etc.) es ejercida sobre todo por organizaciones empresariales privadas, estatales o mixtas. Esta gestión del aprovechamiento del agua en forma sectorial se ejerce normalmente en el ámbito de cada usuario, que puede ser una zona urbana o rural, una zona minera o industrial, un área de riego, un sistema hidroeléctrico, una sección o tramo de río dedicado a la recreación, la pesca o a la extracción de materiales de construcción. En general estos usuarios del agua realizan acciones económico - productivas.

La tarea central de un proceso de gestión con fines de manejo integral de los recursos hídricos es la de resolver los conflictos que ocurren entre:

- El hombre y su entorno natural o alterado por el mismo (ej. controlar inundaciones).
- Los múltiples usuarios que compiten por un mismo recurso (ej. competencias por utilizar las misma agua).
- Los usuarios actuales y los de las futuras generaciones (ej. conservar las cuencas de captación).
- Los usuarios de un espacio sujetas a intervenciones del exterior (ej. conflictos con usuarios que desean exportar agua)

Técnicamente los encargados de la gestión con fines de manejo integral del agua, para compatibilizar la oferta y la demanda, tienen dos grupos de opciones complementarias.

El primer grupo de opciones consiste en:

- i) Captar la oferta del agua disponible en cuencas y fuentes subterráneas y atmosféricas mediante el fomento y la construcción de obras hidráulicas de regulación, captación, conducción, tratamiento, distribución, recuperación y evacuación del agua tanto superficial como subterránea; o bien,

- ii) Conservar o aumentar la oferta del agua mediante el manejo de las cuencas hidrográficas de captación, tanto en la atmósfera, como en la superficie y bajo ella (trabajos de hidrología - forestal)

En ambos casos se trata de controlar la cantidad, la calidad, el tiempo y el lugar de la oferta tratando de mantener el equilibrio ecológico y satisfacer demandas de uso múltiple.

El segundo grupo de opciones actúa sobre la demanda, pudiéndose:

- i) reducir el incremento de la demanda en zonas deficitarias de agua limitando el crecimiento urbano e industrial, y, en general, desplazando a usuarios altamente consumidores o contaminantes a zonas con mayor disponibilidad de recursos; o bien,
- ii) Aumentar la eficiencia del uso del agua por unidad de producción o de consumo mediante una mejor operación y mantenimiento de los sistemas hídricos construídos y un mejor manejo y conservación y recuperación de los recursos sobre todo para preservar la calidad de los mismos facilitando su uso múltiple.

En teoría, los procesos de gestión con fines de manejo integral del agua podrían evaluarse según si tiene o no capacidad para permitir alcanzar objetivos prefijados o partiendo de una situación dada. La eficiencia, eficacia y efectividad de la gestión se mediría en función de los tiempos y recursos que se tuvieron que emplear para alcanzar él o los objetivos propuestos y los resultados logrados efectivamente.

A partir de estas afirmaciones se puede decir que para evaluar un proceso de gestión en general se requieren, por lo menos, conocer dos aspectos:

- i) Conocer, cualitativa y cuantitativamente los objetivos que se quieren alcanzar y cuáles, efectivamente, se lograron y como se han satisfecho los intereses de los actores involucrados y del medio ambiente; y,
- ii) Conocer los recursos que se invirtieron (tiempo, personal, equipo, presupuesto, etc.) para lograrlo y cuantos menos o más recursos se hubieran invertido para lograr lo mismo en caso de que se hubiese aplicado un sistema de gestión diferente.

Con respecto al primer punto, es obvio que señalar tan solo que lo que se desea es un "manejo racional del agua" no es suficiente. Tampoco lo es el alcanzar objetivos parciales sin considerar qué efecto tendrán estos logros en otras personas o en el entorno a corto, mediano y largo plazo.

Para que exista la posibilidad de una gestión efectiva se debe definir, con mucha más precisión que la acostumbrada, que es lo que se quiere y a quiénes va a servir. Esto, a su vez, incorpora dos condiciones necesarias en un proceso de gestión con fines de uso múltiple del agua:

- i) Conocer en profundidad el entorno físico-ambiental que se está modificando y se modificará para compatibilizar la oferta y la demanda de agua en cantidad, calidad, lugar y tiempo de ocurrencia (situación ambiental).
- ii) Conocer a cabalidad el conjunto de actores (sus criterios, problemas y objetivos) que se encuentran o se encontrarán afectados directa o indirectamente por el proceso de gestión de los recursos hídricos, tanto en situaciones actuales como futuras (situación social).

De lo anterior se infiere que un sistema de gestión para el uso múltiple de los recursos hídricos debe diseñarse de tal forma que en su organización se encuentre reflejada:

- i) La composición y complejidad del entorno físico-ambiental en donde se realizará la compatibilización entre la oferta y la demanda de agua, y

- ii) La composición y complejidad de los usuarios que utilizan dicho entorno y que se ven afectados por el mismo.

Esto significa que, en una organización para la gestión del uso múltiple del agua debe reflejarse, como en un espejo, las características del sistema hídrico que va a administrar. Los intereses de los usuarios para los cuales se realiza la administración definen la orientación de dicho sistema de gestión.

Es muy importante recordar en todas estas observaciones que debe diferenciarse el objeto de gestión (un sistema hídrico natural, una cuenca, un ecosistema, un hombre) del proceso mismo de gestión. Lo que debe ser integral es el tratamiento del sistema hídrico inclusive si el proceso de gestión no es en sí "integral" pero si coordinado.

LOS NIVELES EN QUE SE AGRUPAN LOS PROCESOS DE GESTION DEL AGUA

Los procesos de gestión tendientes a posibilitar una gestión con fines de manejo integral del agua, aplicados en un determinado ámbito o unidad territorial, pueden catalogarse en varios niveles. Dichos niveles de gestión están relacionados con la orientación con la que los gestores intervienen en dicho territorio. Unos lo hacen con el interés de conocer como funciona o como se comporta el sistema natural, otros lo hacen para extraer recursos o disponer desechos, otros lo hacen para garantizar el manejo integrado de los recursos y el control de los fenómenos naturales extremos, y por último, otro grupo se encarga de orientar los procesos de utilización de los recursos naturales y el ambiente en general para satisfacer las necesidades de desarrollo. Cada uno de estos niveles se describen a continuación.

El primer nivel de gestión (Científico-Ambiental), usualmente lo realizan los grupos o asociaciones estatales o privados de investigadores en recursos hídricos. Estos profesionales, son responsables de la realización de estudios e integración científicas relacionadas con el agua, con los recursos naturales asociados y con el medio ambiente en general; así como, de proporcionar la información básica para conocer como funcionan los ecosistemas y el potencial de los recursos naturales del ámbito en estudio.

El segundo nivel de gestión (Económico-Productivo), es el que usualmente está en manos de usuarios individuales representados principalmente por empresas de aprovechamiento de agua. Dichas empresas u otras formas de organización para el aprovechamiento del agua, vienen a ser los usuarios directos del agua y de los recursos asociados al mismo.

Los gestores que pertenecen a este nivel generalmente actúan en forma individual al intervenir en los sistemas hídricos compartidos. En este sentido, cada cual regula, extrae, utiliza y retorna agua al sistema hídrico sin preocuparse de las interferencias que pueda tener con los otros usuarios. Esto se debe a que el tercer nivel de gestión que se describe a continuación no cumple su rol o no existe.

El tercer nivel de gestión (Técnico-Normativo), es el que, por definición, debe velar por el uso múltiple del agua (balance oferta-demanda) lo que usualmente es dirigido por el Estado. En algunos casos puede suceder que, si no existe este nivel técnico-normativo estatal, el nivel económico productivo opte por autoregularse, creando sus propias normas de operación conjunta. Ello normalmente sucede solo a nivel de sistemas hídricos compartidos (canales, ríos) y no a nivel nacional. Desde el nivel técnico-normativo se deben orientar y controlar los procesos de gestión para el manejo integral de los recursos hídricos y el uso múltiple del agua.

Pertenecen a este nivel las direcciones generales de agua y las secretarías de recursos hídricos. También se integran en este nivel los encargados de controlar los fenómenos naturales extremos (sequías e inundaciones) y los encargados de evitar los impactos ambientales negativos al hombre, como la contaminación del agua por ejemplo.

Lamentablemente gran parte de los organismos estatales técnico-normativos del agua están ubicados dentro de los sectores económico-productivos (dentro del sector agrícola, salud, minero, energético u otro) y por lo tanto, en lugar de actuar como técnico-normativo para el uso múltiple del agua actúan en forma sectorial y en clara competencia entre ellos. ***Por ello el nivel técnico-normativo debe ubicarse fuera de los sectores específicos que compiten por el agua y depender ya sea de un primer ministro (la presidencia) o bien de una secretaría ambiental.***

La labor técnico-normativa del Estado es necesaria desde el momento en que las aguas son esencialmente de dominio público y por lo tanto es usualmente el Estado quien asigna derechos u otorga concesiones.

El estado en teoría debería asistir la coordinación de las actividades de las organizaciones encargadas de controlar y distribuir la oferta de agua para múltiples usuarios.

Una de sus tareas relevantes es la de velar por la protección del ambiente y a los usuarios contra el mal uso del agua y de los espacios donde se capta y circula dicho recurso, como las cuencas, los acuíferos y embalses de agua subterránea, los cauces y lechos de ríos y lagos y las aguas atmosféricas.

En la coordinación y ejecución de las tareas técnico-normativas no debe excluirse a los sectores usuarios privados, estatales y mixtos, dado que las directivas técnico-normativas son para el beneficio de estos mismos usuarios. Por ello, a nivel de sistemas hídricos compartidos por varios usuarios, deben trabajar en forma conjunta los grupos económico-productivos y los técnico-normativos.

El cuarto nivel de gestión (Político-Social). Este nivel debe ser conducido por grupos consultivos superiores de aguas, que pueden catalogarse como colegios, consejos superiores o comisiones de aguas de un país o región. Dichos grupos deben tener responsabilidad oficial para orientar las políticas de aprovechamiento del agua en función de los planes de desarrollo del país o región. Entre los actores que deben conformar dicho grupo consultivo se encuentran los políticos legalmente elegidos, delegados ministeriales, presidentes de colegios profesionales, representantes de los usuarios, empresas, científico y otros.

Cuando no se dispone de un colegio o consejo superior de aguas se carece de un organismo capaz de orientar el aprovechamiento de los recursos hídricos en función de las metas de desarrollo del país así como, en forma complementaria orientar el desarrollo del país en función de las disponibilidades de los recursos hídricos. En situaciones de falta de estos organismos consultivos de alto nivel no se puede asistir a los propios usuarios para coordinar sus actividades. En casos de conflictos entre los usuarios tampoco se tiene una instancia para dirimir, o suministrar a los poderes judiciales, los informes técnicos requeridos para sancionar las situaciones.

La gestión de los recursos hídricos requiere que estos cuatro niveles de intervención se articulen debidamente Ello es complicado porque cada uno de los actores presentes en los niveles mencionados tienen y actúan con racionalidades diferentes, muchas veces conflictivas, por ejemplo: el grupo científico se basa en una lógica científico-técnica que se sustenta en su conocimiento e interpretación del ámbito físico; el grupo de usuarios se sustenta esencialmente en una lógica económica; el grupo institucionalizado estatal se sustenta en normas técnicas.

LOS AMBITOS DE GESTION CON FINES DEL USO DEL AGUA

Para alcanzar las metas de manejo integral de los recursos hídricos y coordinar las acciones de los cuatro niveles previamente definidos es necesario trabajar y relacionarse con ámbitos - unidades territoriales - claramente definidos por límites políticos, administrativos, geográficos, ecológicos, comunales, de tenencia, etc.

En América Latina y el Caribe los ámbitos de gestión, aún vigentes para, gobernar y dirigir el desarrollo, fueron impuestos por razones político-administrativas en una época donde la temática ambiental ni se mencionaba.

Ciertos países tienen, por ejemplo, divididos sus territorios en estados (Brasil, México, Argentina), departamentos (Perú, Bolivia), provincias (Ecuador) o regiones (Chile). A su vez estas divisiones tienen otros límites internos que también cambian de nombre según el país pudiendo ser provincias, cantones, municipios, veredas u otros. Salvo las regiones, en general estas divisiones, hechas para gobernar políticamente, no tienen en cuenta los límites de ecosistemas, cuencas u otras condiciones naturales, lo cual dificulta la conducción del manejo ambiental.

Para reducir estas dificultades, y conducir procesos de gestión ambiental, en particular para la gestión con fines de uso múltiple de los recursos hídricos, es indispensable tomar en cuenta dos criterios de delimitación: el político-administrativo y el geográfico-ecológico. Si se llegan a conjugar los sistemas de gestión con relación a estos dos límites es posible llegar a una forma más efectiva de gestión ambiental.

Para lograr esta conjugación de sistemas de gestión que se cruzan sobre espacios delimitados con diferentes criterios existen tres opciones que han sido frecuentemente tratadas:

La primera ha sido la de reacondicionar los límites político-administrativos para que se "acerquen" a los límites geográficos o ambientales de tal forma que el sistema de gobierno político pueda también ocuparse de la parte ambiental. Esto se ha logrado en parte con algunas regionalizaciones.

La segunda opción ha sido la de crear comisiones de coordinación para dirigir la gestión de ciertos espacios naturales, tal como cuencas, parques naturales o para la gestión de algunos recursos como el agua, los bosques, la fauna, etc. Esta forma de acción es la más común aun cuando sólo resulta efectiva si se cuenta con la autoridad necesaria y los recursos.

La tercera ha sido la de crear autoridades autónomas o semiautónomas por espacios naturales -- principalmente autoridades de cuencas hidrográficas -- pero también para parques nacionales, franjas costeras y otros. En teoría dichas autoridades deben coordinar con las autoridades encargadas de los gobiernos de tipo político-administrativo. Algunas de estas autoridades pueden actuar sobre espacios que cubren más de un estado, región, municipio y otro espacio político. Muchas veces reemplazan o tienen más fuerza que las propias autoridades regionales o locales pero en otras tienen serias limitaciones impuestas por dichas autoridades.

En la práctica no existe por lo tanto un sistema de delimitación de territorios único dado que no se puede usualmente conjugar en un solo ámbito los tres objetivos básicos del desarrollo sustentable: el crecimiento económico; la equidad social, ambiental y económica y la sustentabilidad ambiental.

Por encima de estos conflictos causados por la búsqueda de una delimitación "ideal" de territorios para alcanzar objetivos conflictivos entre sí en el corto plazo; se *tiene como la única alternativa viable crear sistemas de coordinación funcional entre las autoridades político-administrativas, con las autoridades ambientales, en este caso de recursos hídricos y los propios usuarios*. Deben existir en principio las autoridades de agua o de ambiente y las mismas deben ser consultadas antes de intervenir en el medio como una cuenca o un río.

LA INTERACCION ENTRE LOS NIVELES Y LOS AMBITOS DE GESTION DEL AGUA

La clasificación de los cuatro niveles de gestión del agua, combinados con los ámbitos internacionales, nacionales, macro-regionales ambientales, estatales, departamentales y de cuencas proporciona el primer marco de análisis de la situación de los sistemas de gestión

CUADRO N° 1

INTEGRACION DE LOS NIVELES Y AMBITOS DE GESTION PARA EL MANEJO INTEGRAL DEL AGUA

Ambitos de acción	Niveles de gestión del agua				
	Nivel 1 Científico - ambiental (manejo físico del ámbito)	Nivel 2 Económico - productivo (manejo de demanda de agua)		Nivel 3 Técnico - normativo (manejo de oferta de agua)	Nivel 4 Político - social (manejo de políticas de agua y de desarrollo)
	Estatal o privado	Privado, mixto o estatal		Estatal	Estatal o Privado
Internacional	Organismos de investigación conjuntos	Convenios entre usuarios (usos compartidos)		Tratados internacionales	Comisiones internacionales
Nacional (límites político-administrativos)	Organismos científicos, educacionales y de investigación en materia de recursos hídricos ... Comprenden institutos, servicios, laboratorios, universidades y centros de recursos hídricos, hidráulica, hidrología y otros.	Empresas • Agua potable • Hidro-energía • Riego y drenaje • Piscicultura	Ministerios • Salud • Energía • Agricultura • Pesca	Organismo técnico-normativo nacional ... Constituido por los encargados de aplicar leyes de aguas y de manejar el uso múltiple del agua a nivel nacional (Dirección General de Aguas, Secretaría de Recursos Hídricos)	Grupo consultivo nacional ... Con participación equitativa de representantes de los cuatro niveles de gestión: • técnico-normativo • político-social • científico-ambiental • económico-productivo
Macrorregión ambiental (límites ecopolíticos)	Organismos científicos, educacionales y de investigación en materia de recursos hídricos ... Comprenden institutos, servicios y otros existentes en las regiones o estados que forman la macrorregión ambiental.				
Estados o regiones (límites político-administrativo)		Empresas • Agua potable • Hidro-energía • Riego y drenaje • Piscicultura	Ministerios • Salud • Energía • Agricultura • Pesca	Organismo técnico-normativo regional o estadual ... Constituido por los encargados de aplicar leyes de aguas y de manejar el uso múltiple del agua a nivel regional o estadual (Secretarías Regionales Ministeriales o equivalentes)	Grupo consultivo regional o estadual de aguas ... Con representación equitativa de los niveles • técnico-normativo • político-social • científico-ambiental • económico-productivo
Cuenca o sistema de cuencas hidrográficas (límites hidrogeográficos)	Corporaciones o agencias autónomas de gestión de cuencas hidrográficas ... (financieras, ejecutivas y operativas, encargadas de compatibilizar la oferta de agua)				Comité de cuenca ... Grupo consultivo-asesor a nivel de cuenca, con participación equitativa de representantes de los niveles • técnico-normativo • político-social • científico-ambiental • económico-productivo
	Con igual representación de técnicos, usuarios y Estado				

Fuente: Elaborado por Axel Dourojeanni y Juan Gómez Ortega, CEPAL, 1991.

hídrica en un país.

A pesar de parecer muy simple, el marco conceptual presentado en el cuadro 1, aporta valiosísimos elementos de evaluación para estudiar el comportamiento del accionar de los procesos de gestión. El citado cuadro, donde se combinan los cuatro niveles de gestión del agua con los ámbitos de gestión permite en principio explicar como debería funcionar un sistema de gestión con participación privada, estatal y de la población en general.

En el ámbito nacional y al nivel de gestión político-social es necesaria la presencia de un grupo consultivo-resolutivo del agua. Algunos países disponen de consejos o colegios superiores de agua, aún cuando no siempre son operativos como en el Perú, pero la mayoría no tienen esta instancia en materia hídrica.

Recientemente en algunos países se han instalado comisiones del medio ambiente pero éstas no son específicas para conciliar los objetivos de desarrollo con el uso y el manejo del agua.

El disponer de una instancia máxima en materia hídrica, tanto a nivel nacional como regional o departamental, es esencial. Sus principales tareas son las de compatibilizar las acciones de crecimiento económico con las de gestión del agua y el ambiente como un todo. Es la instancia donde pueden confluír la opinión pública con la de los científicos, políticos y legisladores así como los empresarios del agua, para conciliar intereses, resolver conflictos y otros.

El grupo consultivo debe encargarse de la formulación y manejo de la política nacional de aguas, de asesorar e informar al ejecutivo sobre los planes de recursos hídricos nacionales, regionales y de cuencas hidrográficas y de otras materias relacionadas con el agua para la fijación de dicha política. A este nivel se deben prever y evitar conflictos entre usuarios, coordinar acciones de prevención de fenómenos extremos, conciliar usos múltiples, velar por los aspectos ambientales y otros. Los informes amparados por el grupo consultivo-resolutivo son también una base importante para dirimir conflictos de tipo legal.

Para operar debe designar como secretaría ejecutiva a los organismos técnico-normativos. Puede solicitar también informes de los propios usuarios y de los organismos científicos cuando sea necesario.

ESTAMOS EN CAPACIDAD DE REALIZAR UNA GESTION INTEGRADA?

Aceptada la hipótesis de la importancia de la gestión de los recursos hídricos, como ya citamos, en el contexto de que ésta debe orientarse a la maximización equilibrada de los beneficios sociales (equidad), económicos (crecimiento económico) y ambientales (sustentabilidad ambiental), debemos preguntarnos en qué punto de avance está Bolivia para poder encarar el proceso.

A nuestro modo de pensar, en el momento existe una profusa estructura en la que se puede reconocer muchos de los niveles y ámbitos antes citados, sin embargo hay tres puntos básicos sobre los que debe sustentarse el manejo racional de los recursos hídricos y que a nuestro juicio aún están ausentes o se dan en forma incipiente.

- Un conocimiento profundo de la disponibilidad y demanda de agua (Evaluación de Recursos Hídricos)
- Un marco legal que respalde los procesos relativos a la gestión (Ley de Aguas)
- Un marco institucional, capaz de llevar a cabo la gestión de Recursos Hídricos en todas sus etapas e instancias. (Autoridad de Aguas)

Con referencia al primer punto es preciso señalar que en los últimos años se han realizado múltiples esfuerzos, aunque dispersos, por cuantificar los recursos hídricos en diferentes regiones del país. A pesar de ésto, a la fecha no se conoce con la precisión

necesaria su distribución espacial ni temporal (cantidad) y mucho menos su estado (calidad).

En referencia a los puntos que involucran legislación y marco institucional es bueno citar que no existe una ley de aguas en el país, aunque se han elaborado muchos proyectos; el último de ellos el presentado en 1987/88 y que hasta la fecha permanece en el congreso nacional sin ser dejar de ser eso: un proyecto, lo cual además involucra la no existencia de una autoridad de aguas real.

La historia en los países de la región ha demostrado que las fuerzas que impactan mayormente en los procesos de gestión del agua no han sido precisamente las recomendaciones de los técnicos del área. Los cambios políticos y económicos, la necesidad de reducir el gasto público, la privatización, los intereses sectoriales de uso del agua o una epidemia como la del cólera, entre otros, han tenido más influencia en la formulación de códigos y leyes de agua y en la organización del sistema de gestión, que las necesidades mismas del manejo del uso múltiple del agua y el ambiente. Muchos de los factores citados han convergido en nuestro país en los últimos tiempos y han vuelto a generar conciencia de la importancia que tiene el agua en el entorno y la vida del hombre y en su crecimiento económico. En esta oportunidad deseamos llamar la atención de los niveles de decisión y de la población toda, sobre la problemática del agua en la actualidad, los instrumentos que se requieren y las acciones inmediatas que deberían emprenderse para una verdadera "gestión integral".

Los tiempos del "use y descarte", tanto con los recursos hídricos como con cualquier otro recurso natural, han quedado lejos y es obligación de todos los niveles de gestión (científico - ambiental, económico - productivo, técnico - normativo, político - social) y en todos los ámbitos (internacional, nacional, regional, local) tomar las acciones concretas para dar curso a la tan deseada "gestión integral". En este orden de cosas es imprescindible promover : una pronta promulgación de la Ley de Aguas, que incluya el marco institucional y la autoridad de aguas correspondiente y la realización de la Evaluación Cuantitativa y Cualitativa de los Recursos Hídricos de Bolivia como requisitos para la gestión y aprovechamiento sostenibles de dichos recursos.

LA HIDROLOGIA Y LOS RECURSOS HIDRICOS
DE AMERICA LATINA Y EL CARIBE:
EL APOYO DE UNESCO

Carlos FERNANDEZ-JAUREGUI

UNESCO/ORCYT, Montevideo Uruguay

INTRODUCCION

La problemática del desarrollo de América Latina requiere soluciones de corto, mediano y largo plazo. Dichas soluciones deben ser congruentes con el medio ambiente y con la realidad socio-política y económica de la región, así como la percepción de la situación futura.

UNESCO, en el marco de su programa de hidrología y recursos hídricos, el Programa Hidrológico Internacional (PHI), ha definido un plan a mediano plazo en la región, como resultado de las necesidades manifiestas e identificadas a nivel nacional, subregional y regional.

El principal objetivo del PHI en la región se puede resumir de la siguiente manera: ejecución de la planificación integrada y multiobjetivo de los recursos hídricos basada en una evaluación de la oferta y la demanda y el desarrollo y adecuación de técnicas apropiadas de gestión para un uso racional y ambientalmente sostenible.

A continuación se detallan brevemente las acciones del programa:

EVALUACION DE RECURSOS HIDRICOS

El subprograma ha sido dividido en 4 proyectos que tratan los diferentes componentes de la evaluación:

Balance hídrico superficial. El proyecto ha desarrollado una guía metodológica y cada país ha iniciado el proyecto a nivel nacional. Se han llevado a cabo dos talleres de evaluación en La Paz, Bolivia (1987) y Panamá (1988). La situación es la siguiente:

América del Sur. Dos países están en la primera fase (recolección de datos): Guyana y Suriname. Tres están en la tercera fase (evaluación de parámetros): Brasil, Perú y Uruguay. Uno está en la cuarta fase (cálculo del balance): Venezuela. Uno está en la quinta fase (mapas de isolíneas): Colombia. Tres están en la sexta fase (síntesis nacional): Argentina, Ecuador y Paraguay. Dos han concluido la séptima fase (publicación nacional): Bolivia y Chile.

Istmo Centroamericano y México. Dos países están en la primera fase: Belice y Nicaragua. Dos están en la segunda fase (análisis de consistencia): Costa Rica y Honduras. Dos están en la tercera fase: El Salvador y Panamá, uno en la cuarta fase: México, y una en la sexta fase: Guatemala.

Se han elaborado documentos de proyecto sobre el balance hídrico superficial de la cuenca amazónica y caracterización geomorfológica de las subcuencas de altas montañas de la cuenca amazónica, como apoyo al balance hídrico mediante el

uso de PCs, los cuales han sido presentados a las agencias de financiamiento. Se lleva a cabo un proyecto en Venezuela sobre la determinación de la cuenca hidrográfica con financiamiento extrapresupuestario ESA/CEE/UNESCO.

Mapa hidrogeológico. El proyecto definió sus leyendas y normas y cada país ha iniciado el proyecto a nivel nacional. Se han llevado a cabo cinco talleres de evaluación: Kingston, Jamaica (1980), Santo Domingo, República Dominicana (1985), Río de Janeiro, Brasil (1986), San José, Costa Rica (1988) y Caracas, Venezuela (1988). La situación actual es la siguiente:

América del Sur. Todos los países han concluido la preparación de mapas y memorias descriptivas y se encuentran en la cuarta fase (publicación nacional).

Istmo Centroamericano y México. Tres países están en la primera fase (recolección de información): Belice, Honduras y Panamá. Tres están en la segunda fase (mapeo): El Salvador, Guatemala y Nicaragua. Dos están en la cuarta fase (publicación): Costa Rica y México.

Caribe. 24 países o territorios dependientes están en la tercera fase (memoria descriptiva): Anguilla, Antillas Francesas, Antillas Holandesas, Aruba, Barbados, islas colombianas, Cuba, Dominica, Granada, Haití, islas hondureñas, Jamaica, islas mexicanas, Montserrat, Puerto Rico, República Dominicana, San Cristóbal y Nieves, San Vicente y las Granadinas, Santa Lucía, Trinidad y Tobago, Turcas y Caicos, Islas Vírgenes Británicas, Islas Vírgenes de los Estados Unidos e islas venezolanas. Cuatro están en la cuarta fase: Antigua y Barbuda, Bahamas, Bermuda e Islas Cayman.

Diagnóstico de las actividades de evaluación de recursos hídricos. El proyecto ha desarrollado una guía UNESCO/OMM. Se llevó a cabo una evaluación de la región en base al proyecto UNESCO/OMM/PNUD en el año 1990. La situación actual es la siguiente:

En preparación: Costa Rica, Chile, Guatemala, Panamá, Paraguay, Uruguay y Venezuela.

Concluido: Bolivia.

Se ha definido un programa de cooperación dentro del marco del V Ciclo PNUD Y UNESCO 1992-1996.

Evaluación ambiental integrada del desarrollo de recursos hídricos. El proyecto ha desarrollado unas directrices metodológicas UNESCO/PNUMA. Se llevan a cabo aplicaciones concretas en diferentes proyectos específicos. Lago Titicaca (Perú-Bolivia), IV Región de Chile, cursos de formación del CIDIAT (Venezuela).

Sobre el tema general de evaluación de recursos hídricos en la región, se ha preparado un documento de proyecto titulado Sistema de observación e información del ciclo hidrológico y las actividades en recursos hídricos de América Latina y el Caribe por parte de UNESCO/Banco Mundial, y se preve la participación de OMM, PNUMA y ESA.

DESARROLLO DE LOS PROCESOS HIDROLOGICOS Y SUS TECNICAS

El subprograma ha sido dividido en 5 proyectos que son los siguientes:

Hidrología andina. Las principales actividades se concentraron en el estudio de: Evaporación, evapotranspiración, transporte de sedimentos, desarrollo de modelos matemáticos y físicos sobre tópicos específicos, y la preparación de normas en hidráulica e hidrología. Participan Argentina, Bolivia, Colombia, Chile, Ecuador, Perú y Venezuela.

Hidrología y recursos hídricos del trópico húmedo. Las principales actividades se concentran en el estudio del ciclo hidrológico . Se ha creado un centro del agua del trópico húmedo de América Latina y el Caribe (CATHLAC) en Panamá en 1992, y un subcentro de drenaje urbano para el trópico húmedo (RSCB) en Sao Paulo, Brasil en 1991, en los cuales participan todos los países del trópico húmedo; y se lleva a cabo un proyecto extrapresupuestario sobre cambios en el uso de la tierra y su influencia en el ciclo hidrológico en la cuenca amazónica UNESCO/PNUMA/CTH.

Hidrología de llanuras. La principales actividades fueron dos coloquios y se encuentran en preparación las memorias de los proyectos de investigación llevados a cabo en Argentina, Uruguay y Venezuela.

Hidrología de zonas áridas. Las principales actividades se han llevado a cabo en los altiplanos de los países andinos, el nordeste brasileño, y Tlaxcala (México). Los temas principales de investigación fueron: gestión de los recursos hídricos, estudios sobre el comportamiento del ciclo hidrológico y técnicas de uso y conservación.

Hidrología de nieve y hielo. Se han llevado a cabo dos talleres que definieron los siguientes temas: investigación de glaciares, cursos de formación y tres grupos de trabajo. ORCYT también coordina a nivel regional el proyecto H-4-2 (Japón). Participan: Argentina, Bolivia, Chile, Ecuador y Perú.

PROYECTO REGIONAL MAYOR SOBRE USO Y CONSERVACION DE RECURSOS HIDRICOS EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE (PRM/LAC)

El proyecto se divide en tres categorías y subproyectos:

Desarrollo de técnicas hídricas con proyectos específicos. Se llevaron a cabo 133 proyectos en 23 países de la región en los últimos 5 años en las siguientes áreas: manejo de recursos hídricos, riego y drenaje, agua potable y saneamiento, educación y divulgación, energía rural, hidroeconomía rural y desarrollo integrado.

Desarrollo de proyectos piloto integrados, con el agua como elemento aglutinador. Se llevan a cabo 15 proyecto en la región.

Proyectos de desarrollo. En base a los proyectos piloto, 4 países están ejecutando 7 proyectos extrapresupuestarios por administración directa.

FORMACION Y CAPACITACION DE ESPECIALISTAS

El subprograma ha sido dividido en tres grupos:

Cursos cortos. Se impartieron 5 cursos por año sobre temáticas relativas al PHI de la región con duración de 20 horas/curso a 240 horas/curso.

Cursos de postgrado (Maestría y Doctorado). Se llevan a cabo dos cursos de postgrado en México.

Red de cursos de postgrado en hidrología y recursos hídricos. Se llevó a cabo una reunión de evaluación y coordinación con los directores de cursos auspiciados por UNESCO y otras agencias de cooperación en el marco del proyecto E-3-1 del PHI-IV.

RED DE CENTROS DE INVESTIGACION EN HIDRAULICA E HIDROLOGIA Y BANCO DE DATOS DE HIDROLOGOS E HIDROGEOLOGOS CERTIFICADOS DE LA REGION.

El proyecto ha llevado a cabo las siguientes actividades:

Directorio de centros de investigación en hidráulica e hidrología

Directorio de hidrólogos e hidrogeólogos

Red electrónica de servicio científico computarizado vía UNESCO/Dialo y EARN

Cooperación técnica entre centros de investigación, UNESCO y AIIH (convenio 1991-1992)

PUBLICACIONES SOBRE HIDROLOGIA Y LOS RECURSOS HIDRICOS, CLEARING HOUSE

El proyecto ha realizado 6 actividades principales:

- . Publicación de documentos científicos
- . Publicación de guías metodológicas
- . Publicación del Boletín de Informaciones del PHI en español
- . Preparación de audiovisuales sobre los proyectos de desarrollo
- . Divulgación de información sobre fuentes de financiamiento
- . Divulgación de documentos de popularización de UNESCO y otras organizaciones

IDENTIFICACION, PREPARACION, FINANCIAMIENTO, EJECUCION, MONITOREO Y EVALUACION DE PROYECTOS DE DESARROLLO DE RECURSOS HIDRICOS

Esta actividad se implementa en base a un plan de acción que coincide con los ciclos de programación de PNUD, PNUMA, OMM, FAO, UNICEF y otras agencias de cooperación como la GTZ, ORSTOM, CEE, USAID, COSV, DANIDA, CEDEZ, JICA y otras. Las actividades más relevantes fueron las siguientes:

De acuerdo a la resolución N° 10 de la revisión del PHI/LA, llevada a cabo en Montevideo en 1990, se invitó a todos los países a presentar propuestas de proyectos. Se recibieron 233 propuestas en medios ambiente, de las cuales el 41% correspondió al PHI y en la actualidad se preparan los documentos de proyecto y negociaciones con las agencias financieras.

Se lleva a cabo el monitoreo de los proyectos de administración directa según los términos de cada proyecto.

Se define proyecto por proyecto el apoyo de los bancos de desarrollo según una estrategia definida de mutuo acuerdo.

REUNIONES REGIONALES

Reunión de comités nacionales del PHI de América del Sur, América Central y México, Montevideo, Uruguay, noviembre 1990. Participaron 14 países y se aprobaron 12 recomendaciones dirigidas a los países, UNESCO y la cooperación internacional, sobre: creación de comités nacionales, formación y entrenamiento, balance hídrico superficial, mapa hidrogeológico, actividades de evaluación de recursos hídricos, Proyecto Regional Mayor, participación en el IV Fase del PHI, desarrollo científico y tecnológico.

participación de la región en misiones de cooperación técnica, actividades extrapresupuestarias, elaboración de directorios, cooperación internacional y apoyo a las resoluciones del Consejo Intergubernamental del PHI. Los observadores fueron 6 organismos que trabajan conjuntamente con UNESCO en el PHI/LAC.

Taller subregional sobre hidrología, St. Augustine, Trinidad, Indias Occidentales, mayo 1990. Participaron 15 países y se aprobaron 9 recomendaciones sobre: política, coordinación, agencias, legislación, análisis de costo-beneficio, aspecto ambientales, formación, sistemas de información y temas específicos.

Reunión de autoridades del PHI Y OMM de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay, Montevideo, Uruguay, diciembre 1991. Se trataron 5 temas sobre: conferencia de Dublín, diagnóstico de actividades nacionales de evaluación de recursos hídricos, planes maestros de desarrollo de recursos hídricos, proyecto HOMS, grupo de trabajo de hidrología AR-III.

Anexo

BIBLIOGRAFIA DEL PHICAB (Completada en Noviembre 1992)

1982

Roche M.A. 1982. Les conditions d'une étude hydrologique en Amazonie Bolivienne. Publ. Phicab, La Paz, 31 p.

1984

Roche M.A., Canedo M., 1984. Programa Hidrológico y Climatológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia. Plaquette Orstom-Senamhi, La Paz, 4 p.

1985

- Abasto N., Hoorelbecke R., Roche M.A., & al. 1985. Características y calibración de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 120 p.
- Abasto N., Hoorelbecke R., Roche M.A., Rubin de Celis L. 1985. Alturas de agua y caudales, limnigramas e hidrogramas de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 70 p.
- Apoteker A., Roche M.A., Rubin de Celis L. 1985. Programas informáticos para el procesamiento de datos de conductividad de agua, PHICABC. Publ. Phicab, La Paz, 21 p.
- Espinoza Torrico O. 1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Beni, Amazonía, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 181 p.
- García Hühn W. 1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Mamoré, Amazonía, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 110 p.
- Guzman W.D., Roche M.A. 1985. Programas de análisis pluviométricos. Publ. Phicab, La Paz, 24 p.
- Lozada Encinas G.A. 1985. Balance hídrico de la cuenca del Lago Titicaca. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 158 p.
- Mariaca Carrasco J.J. 1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del Lago Poopo y los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 203 p.
- Roche M.A. & Rocha N. 1985. Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4,000,000^{ème}, Publ. Phicab, La Paz.
- Ronchail J. 1985. Situations météorologiques et variations climatologiques en Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 64 p.
- Ronchail J. 1985. Relations de saisons remarquables avec la structure de l'atmosphère et les situations météorologiques sur l'Altiplano Boliviano-Peruvien. Publ. Phicab, La Paz, 38 p.
- Rubin de Celis L., Roche M.A. 1985. Programas informáticos para el procesamiento de datos hidrométricos básicos PHICABHQ. Publ. Phicab, La Paz, 58 p.

1986

- Bourges J. 1986. La red hidrométrica del Phicab y los primeros resultados obtenidos, 37-43. In 1^{er} Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Guyot J.L. 1986. Evolución en el espacio y el tiempo de las concentraciones de materia en solución y en suspensión de las aguas de la cuenca amazónica de Bolivia, 48-53. In 1^{er} Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia, La Paz, Sept. 1986. Publ. Orstom, La

- Paz.
- Guyot J.L. 1986. Résultats d'une campagne d'échantillonnage en basses eaux en Amazonie bolivienne. Publ. Phicab, La Paz, 16 p.
- Roche M.A. 1986. Présentation general del PHICAB, 26-28. In 1^{er} Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A. 1986. Distribuciones espacio-temporales de los parametros climatológicos sobre Bolivia, 29-32. In 1^{er} Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A., Abasto N., Toleda M., Cordier J.P., Pointillart C. 1986. Mapa de las salinidades ionicas de los rios de la cuenca amazonica de Bolivia, 1/10,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Abasto N., Toleda M., Cordier J.P., Pointillart C. 1986. Mapa de concentraciones en aniones de los rios de la cuenca amazonica de Bolivia, 1/10,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Abasto N., Toleda M., Cordier J.P., Pointillart C. 1986. Mapa de concentraciones en cationes de los rios de la cuenca amazónica de Bolivia, 1/10,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C. 1986. Los balances hidricos de Bolivia, 44-47. In 1^{er} Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A. Bourges J., Guyot J.L., Ronchail J. 1986. Le programme climatologique et hydrologique de la Bolivie, Poster. 1^{er} Symposium de la Investigación francesa en Bolivia, Orstom, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C., Apoteker A., Abasto N., Calle H., Tolède M., Cordier J.P., Pointillart C. 1986. Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Publ. Phicab, La Paz, 257 p.
- Roche M.A., Fernandez C., Ronchail J., Bourges J., Guyot J.L. 1986. Participación del PHICAB al simposio de la investigación francesa en Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 35 p.
- Ronchail J. 1986. Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 43 p.
- Ronchail J. 1986. Situations atmosphériques et températures comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie, Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 37 p.
- Ronchail J. 1986. Variations climatiques hivernales à Santa Cruz de la Sierra, Amazonie bolivienne. In Impacto del desarrollo en la ecología del tropico boliviano, Santa Cruz, Avril 1986. Publ. Phicab, La Paz, 15 p.

1987

- Abasto Lara N. 1987. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Madre de Dios, Amazonía, Bolivia, Peru. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 260 p.
- Bourges J. 1987. Projet de Cachuela Esperanza. Etude sommaire des apports. Publ. Phicab, La Paz, 20 p.
- Bourges J., Cortes J., Hoorelbecke R. 1987. Etude des débits du Río Mamoré à Guayaramerin. Publ. Phicab, La Paz, 26 p.
- Bourges J., Cortes J., Hoorelbecke R. 1987. Estudio de los caudales del Mamore en Guayaramerin. Publ. Phicab, La Paz, 29 p.
- Chavez G.A. 1987. Generación de crecidas en la cuenca del Río Ichilo en base al modelo matemático HUIG, Amazonía, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 276 p.
- Cruz Llanos C. 1987. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Itenez, Amazonía, Bolivia, Brasil. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 216 p.
- Fernandez Jáuregui C.A., Roche M.A., Aliaga A., Peña J. 1987. Los recursos hídricos en Bolivia. Publ. Phicab, La Paz, 20 p.
- Gouze P., Ferhi A., Fontes J.C., Roche M.A. 1987. Composition isotopique (¹⁸O) de la matière organique des tourbières actuelles et holocènes en Bolivie. Résultats préliminaires et perspectives d'application en paléoclimatologie. 29-30. In Paléolacs, Paléoclimats. Orstom, Bondy. Géodynamique, 2(2) : 113-116.

- Guyot J.L., Calle H., Quintanilla J., Calliconde M. 1987. Resultados de una campaña de muestreo en periodo de aguas bajas en la Amazonía boliviana. Revista Boliviana de Química 7(1) : 36-50.
- Herbas C.H. 1987. Climatología de la cuenca andina y amazónica del Río Grande, Bolivia. Tesis Umsa. Publ. Phicab, La Paz, 237 p.
- Roche M.A., Fernandez Jáuregui C. 1987. Ressources hydriques, salinités et exportations salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Publ. Phicab, La Paz, 44 p.

1988

- Arellano Albornóz R. 1988. Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Pilcomayo, Río de La Plata, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 100 p.
- Benavidez Fuentes C.F. 1988. Influencia de los cambios en el uso del suelo sobre el escurrimiento y la erosión en la cuenca del Río Pirai. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 241 p.
- Bourges J. 1988. Necesidad de una red hidrométrica para el desarrollo. Aplicación a la represa de Cachuela Esperanza, 90-97. In 2^{do} Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Publ. Orstom, La Paz.
- Carvajal Fernandez J. 1988. Climatología e hidrología, estudio de crecidas por el modelo Hymo 10 en la cuenca del Río Pirai, Amazonía andina, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 276 p.
- Corbin D., Guyot J.L., Calle H., Quintanilla J. 1988. Datos fisico-quimicos de los medios acuaticos de la zona del Mamoré central, región de Trinidad, Amazonía boliviana. Publ. Orstom, La Paz, N°8, 58 p.
- Guyot J.L., Bourges J., Hoorelbecke R., Roche M.A., Calle H., Cortes J., Barragan M.C. 1988. Exportation de matières en suspension des Andes vers l'Amazonie par le Rio Béni, Bolivie, 443-451. In Sediment Budgets, M.P. Bordas & D.E. Walling (eds.), IAHS Publ. 174.
- Guyot J.L., Calle H., Cortes J., Barragan M.C. 1988. Aportaciones de sedimentos por el Río Beni a los sitios potenciales de presas, 107-113. In 2^{do} Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Guyot J.L., Corbin D., Quintanilla J., Calliconde M., Calle H. 1988. Caracterización físico-química de los rios y lagunas de la cuenca amazónica de Bolivia, 98-106. In 2^{do} Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Marcantoni O., Apoteker A., Guyot J.L. 1988. Las ultimas exploraciones espeleologicas en Bolivia : el potencial turistico de la región de Torotoro, 185-190. In 2^{do} Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A. 1988. Las aplicaciones del proyecto Phicab al desarrollo de Bolivia, 77-89. In 2^{do} Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, C. Dejoux (ed.), Orstom, La Paz.
- Roche M.A. 1988. Las aplicaciones del PHICAB al desarrollo de Bolivia, Posters. 2^{do} Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, Orstom, La Paz.
- Roche M.A. 1988. CLIMAR2, Logiciel d'exploitation de données pour l'étude des variations climatologiques spatio-temporelles. Publ. PHICAB, La Paz, 90 p.
- Roche M.A. 1988. Evaluation du bilan de radiations et de l'évapotranspiration par formules adaptées pour logiciel. Publ. PHICAB, La Paz, 30 p.
- Roche M.A., Fernandez C. 1988. Water Resources, Salinity and Salt Yields of the Rivers of the Bolivian Amazon. Journal of Hydrology 101 : 305-331.
- Ronchail J. 1988. Variabilidad del tiempo en Bolivia, la anomalia climatica del invierno 1988. Conferencia en la academia de Ciencias. Publ. Phicab, La Paz, 15 p.

1989

- Bourges J. 1989. La investigación hidrológica en el Beni : ejemplos de aplicación para el desarrollo de infraestructuras y previsión de crecidas, 9-22. In 3^{er} Simposio de la

- Investigación francesa en Bolivia, Santa-Cruz, Publ. Phicab, La Paz.
- Bourges J., Carrasco L.M. 1989. Traducción en español de "HYDROM", logiciel de banque de données hydrométriques. Publ. Phicab, 135 p.
- Bourges J., Carriquirborde D. 1989. Hydrom, Manual del usuario, Traducción en español, Publ. Phicab, La Paz, 190 p.
- Bourges J., Guyot J.L., Roche M.A. 1989. La investigación francesa en cooperación en la Amazonia Boliviana : el programa Phicab. 95-121. In Ecología, Desarrollo e Cooperación na Amazonia, UNAMAZ (Eds), Publ. Cooperación Amazonica.
- Bourges J., Guyot J.L., 1989. Projet d'étude du bassin d'Achumani, La Paz, Bolivie. Publ. Phicab, La Paz, 12 p.
- Bourges J., Guyot J.L., Roche M.A. 1989. Programa climatológico e hidrológico da Bacia Amazônia da Bolivia, Poster et Plaquette.- Colloque A Amazonia na Franca, Belem
- Bourges J., Sanchez V. 1989. Hydrom : Quelques programmes utilitaires complémentaires. Publ. Phicab, La Paz, 16 p.
- Frias Cornejo R. 1989. Balance hídric o superficial de la cuenca de los ríos Bermejo y Grande de Tarija, Río de La Plata, Bolivia. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz, 263 p.
- Guyot J.L., Bourges J., Calle H., Cortes J., Hoorelbecke R., Roche M.A. 1989. Transport of suspended sediments to the Amazon by an andean river : the River Mamore, Bolivia, 106-113. In River Sedimentation, IRTCES, Beijing, November 1989.
- Guyot J.L., Bourges J., Roche M.A. 1989. Transporte de sedimentos y materias disueltas en la cuenca amazónica de Bolivia, 1-8. In 3^{er} Simposio de la Investigación francesa en Bolivia, Publ. Phicab, La Paz.
- Guyot J.L., Calle H., Cortes J., Pereira M., Rodriguez H. 1989. Erosión, balance de sedimentos y materias disueltas en la cuenca alta del Río Paraguay (Ríos Pilcomayo y Bermejo, Bolivia), 15-30. In Simposio sobre la preservación del medio ambiente, La Paz, Octubre 1989.
- Guyot J.L., Héral G. 1989. Placer mining operations and modifications of the physical chemical nature of the waters of the Rio Kaka drainage basin (Andes, Bolivia), 115-121. In Sediment and the Environment, Hadley R.F. & Ongley E.D. (Eds.). IAHS Publ. 184.
- Guyot J.L., Roche M.A., Bourges J. 1989. Etude de la physico-chimie des eaux et des suspensions des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne : l'exemple du Rio Béni, 13-41. In 4^{èmes} Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, Septembre 1988.
- Guyot J.L., Roche M.A., Quintanilla J., Calliconde M., Noriega L., Calle H., Cortes J. 1989. Cargas en suspensión, salinidades y transportes de materia sobre el Altiplano Boliviano. Publ. Phicab, La Paz, 20 p.
- Guyot J.L., Wasson J.G., Sanejouand H., Quintanilla J., Calle H. 1989. Primera evaluación del impacto de la ciudad de La Paz sobre el medio amazónico. Evaluación de la fisico-química y del carbono organico total (COT) a lo largo del Río La Paz-Boopi, 31-38. In Simposio sobre la preservación del medio ambiente, La Paz, Octubre 1989.
- Quintanilla J., Calliconde M., Guyot J.L., Roche M.A., Noriega L., Calle H., Cortes J. 1989. Cargas en suspension. salinidades y transportes de materia sobre el Altiplano boliviano. Revista de Ingeniería Sanitaria 4(5) : 54-59.
- Roche M.A. 1989. Water Quality Control in the Humid Tropics. In Development of Hydrology and Water Management Strategies in the Humid Tropics, UNESCO, Townsville, July 1989.
- Roche M.A. 1989. Investigación para la preservación y la recuperación de la calidad del agua, 1-14. In Simposio sobre la preservación del medio ambiente, La Paz, Octubre 1989.
- Roche M.A., Bourges J., Guyot J.L. 1989. Hydrology and Hydrochemistry of the Bolivian Amazon Basin, Poster and extended abstract. IAHS Third Scientific Assembly, Baltimore, May 1989, 8 p.
- Ronchail J. 1989. Advections polaires en Bolivie : mise en évidence et caractérisation des effets climatiques. Hydrologie continentale 4(1) : 49-56.
- Ronchail J. 1989. Advecciones polares en Bolivia : caracterización de los efectos climaticos. Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines, 18(1) : 65-73.
- Ronchail J. 1989. Climatological winter effects of southern advections in Bolivia and north-west Brazil (1973-1984). In 2^{ème} Congrès de Météorologie de l'Hémisphère Sud, Buenos Aires, Novembre 1989.
- Wasson J.G., Guyot J.L., Dejoux C., Roche M.A. 1989. Régimen termico de los ríos de Bolivia.

1990

- Barragán Guzmán M.C. 1990. Estudio sedimentológico de la cuenca andina del Río Beni. Tesis Umsa, La Paz, 267 p.
- Bourges J., Guyot J.L., Hoorelbecke R., Roche M.A. 1990. Analysis of water flow and transportation of sediment in an Andes-Amazonian basin : the River Beni at Riberalta. *In Hydrology and Water management of the Amazon basin*, Manaus.
- Bourges J., Guyot J.L., Carrasco M., Barragan M.C., Cortes J. 1990. Evolution spatio-temporelle des débits et des matières particulaires sur un bassin des Andes boliviennes : le Río Béni, 351 -356. *In Hydrology in Mountainous Regions*, H. Lang & A. Musy (eds.), IAHS Publ. 193.
- Carrasco Nattes M. 1990. Estudio del régimen del escurrimiento superficial en la cuenca andina del Río Beni. Tesis Umsa, Publ. Phicab, La Paz.
- Guyot J.L., Baby P. 1990. Protección de las cavernas y su aprovechamiento, 44-46. *In Acciones y Políticas sobre el Parque Nacional Torotoro*, La Paz.
- Guyot J.L., Baby P., Kaiser C., Marcantoni O., Perret J.F. 1990. Les principales cavités du massif de Torotoro, Andes tropicales de Bolivie. *Spelunca* 37 : 25-28.
- Guyot J.L., Bourges J., Jouanneau J.M., Quintanilla J., Calle H., Gallardo H., Barragan M.C., Wasson J.G. 1990. Evolution of dissolved and sediment loads, during the flood of an andean tributary of the Amazon (March 1988) : the Beni river at Rurrenabaque, Bolivia. *In Hydrology and Water management of the Amazon basin*, Manaus.
- Guyot J.L., Calle H. 1990. Utilisation de mesures journalières de la turbidité pour l'estimation des flux de matières en suspension. L'exemple des fleuves andins de Bolivie. 271-274. *In Hydrology in Mountainous Regions*, H. Lang & A. Musy (eds.), IAHS Publ. 193.
- Guyot J.L., Calle H., Cortes J., Pereira M. 1990. Transport de matières dissoutes et particulaires des Andes vers le Rio de La Plata par les tributaires boliviens (rios Pilcomayo et Bermejo) du Rio Paraguay. *Hydrological Sciences Journal* 35(6) : 653-665.
- Guyot J.L., Gumiel D. 1990. Premières données sur l'hydrogéologie et l'hydrogéochimie du Nord de l'Altiplano bolivien. *Hydrogéologie*, 3 : 159-164.
- Guyot J.L., Roche M.A., Noriega L., Calle H., Quintanilla J. 1990. Salinities and Sediment Transport in the Bolivian Highlands. *Journal of Hydrology* 113 : 147-162.
- Roche M.A., Aliaga A., Campos J., Peña J., Cortes J., Rocha N. 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes boliviennes, 381-388. *In Hydrology in Mountainous Regions*, H. Lang & A. Musy (eds.), IAHS Publ. 193.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de precipitación anual de Bolivia, 1/5,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de temperaturas anuales de Bolivia, 1/5,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de evapotranspiración real anual de Bolivia, 1/5,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de coeficiente de escurrimiento de Bolivia, 1/5,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de caudal específico de Bolivia, 1/5,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.
- Roche M.A., Fernandez C., Abasto N., & al. 1990. Mapa de las cuencas hidrograficas y caudales mensuales de Bolivia, 1/5,000,000^{eme}. Publ. Phicab, La Paz.

1991

- Bourges J., Cortes J., Salas E. 1991. El potencial hídrico del lago, 533-545. *In El Lago Titicaca, Síntesis del conocimiento limnológico actual*, Dejoux C. & Iltis A. (eds.), Orstom/Hisbol, La Paz.

- Bourges J., Ribstein P. 1991. Bilan hydrologique de deux glaciers boliviens. Projet d'étude. Publ. Orstom, La Paz, 17 p.
- Bourges J., Francou B., Ribstein P. 1991. Balance de un glacier boliviano : El Huayna Potosi. *In Tercer Seminario Taller de la red nacional de cuencas hidrograficas*, Santa Cruz, 22-24 Octubre 1991.
- Campos J., Dumont J.F. 1991. Estudio preliminar de fotos aereas del Río Mamoré. Publ. Orstom, La Paz, 22 p.
- Carrasco L.M., Bourges J. 1991 Resumen práctico del manejo de las operaciones básicas del paquete HYDROM, Publ. Phicab, La Paz, 11 p.
- Dumont J.F., Hérail G., Guyot J.L. 1991. Subsistencia, inestabilidad y repartición de los placeres distales de oro. El caso del Río Beni (Bolivia), 43-46. *In International Symposium on Alluvial Gold Placers*, G. Hérail (ed.), La Paz.
- Guyot J.L., Bourges J., Cortes J., Jouanneau J.M., Quintanilla J., Roche M.A. 1991. Regimes hidroquimicos e dos sedimentos dos rios da bacia amazônica da Bolívia, 149-158. *In IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, Novembro 1991, Publ. ABRH, Anais 2.
- Guyot J.L., Corbin D., Quintanilla J., Calle H. 1991. Hydrochimie des lacs dans la région de Trinidad (Amazonie bolivienne). Influence d'un fleuve andin : le Rio Mamoré. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 24(1) : 3-12.
- Guyot J.L., Wasson J.G., Quintanilla J., Calle H. 1991. Los flujos de materias disueltas y en suspensión en algunos tributarios y en el río Desaguadero, 127-132. *In El Lago Titicaca, Síntesis del conocimiento limnológico actual*, Dejoux C. & Iltis A. (eds.), Orstom/Hisbol, La Paz.
- Quintanilla J., Gumiel D., Guyot J.L. 1991. Evaluación preliminar de la hidrogeología e hidrogeoquímica del Norte del Altiplano Boliviano. *Revista Boliviana de Química*, 10(1) : 59-64.
- Roche M.A., Bourges J., Cortes J., Mattos R. 1991. Climatología e hidrología de la cuenca del Lago Titicaca, 83-104. *In El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*, Dejoux C. & Iltis A. (eds.), Orstom/Hisbol, La Paz.
- Roche M.A., Guyot J.L., Bourges J. 1991. Bilan hydrique et de matière dissoute et en suspension du haut-bassin du Rio Madeira. *Journée scientifique du programme Pirat*, Strasbourg, 19 p.
- Roche M.A., Fernandez-Jáuregui C., Aliaga A., Bourges J., Cortes C., Guyot J.L., Peña J., Rocha N. 1991. Water and salt balances of the Bolivian Amazon, 83-94. *In Water Management of the Amazon Basin*, Braga B.P.F. & Fernandez-Jáuregui C. (eds.), Publ. Unesco-Rostlac, Montevideo.
- Wasson J.G., Guyot J.L., Sanejouand H. 1991. Premières données concernant le carbone organique transporté par le Rio Desaguadero (Altiplano bolivien). *Revue des Sciences de l'Eau* 4 : 363-379.

1992

- Bourges J., Hoorelbecke R. 1992. Variation du régime des écoulements dans le système ando-amazonien de Bolivie. *In VIII^{ème} Journées hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, Septembre 1992.
- Bourges J., Ribstein P., Hoorelbecke R., Dietze C., Cortez J. 1992. Precipitaciones y escurrimiento de una pequeña cuenca en zona de montaña : el Río Achumani (La Paz, Bolivia). *In Los recursos hidricos en Bolivia y su dimensión ambiental, AGID Geoscience*, 20 : 303-312.
- Guyot J.L. 1992. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de Doctorat, Géologie-Géochimie, Université de de Bordeaux I, 362 p.

PHICAB
Programa Hidrológico y
Climatológico de la Cuenca
Amazónica de Bolivia