

ELEMENTOS PARA EL ANALISIS DE LA HIDROLOGIA DE LAS REGIONES TROPICALES HUMEDAS ALTERADAS *

por *Mario Claudio Fuschini Mejía*

Las consecuencias hidrológicas del talado de las selvas o bosques es objeto de controversias aquí y en el ámbito científico mundial, debido a las grandes dificultades que se presentan para medir el fenómeno de retención y evaporación del agua en las selvas tropicales y su variación cuando se las elimina. Además, la mayor parte de la bibliografía hidrológica está referida a los bosques en climas severamente fríos cuyo comportamiento hidrológico es totalmente distinto. En estos casos la descripción comparativa de la variación de la escorrentía, al talar el bosque, se complica por la gran relevancia que reviste el tipo de suelo y el comportamiento de la nieve.

Ante las inundaciones que azotaron la Argentina (ríos Paraná y Uruguay) en 1982 y 1983, se suscitó una polémica. Varios profesionales de la ingeniería civil indicaron que el talado de la selva no tenía absolutamente ninguna influencia en la magnitud del fenómeno, y otros dijeron que era sólo el talado de la selva el responsable. En lo que sigue se cuantifica aproximadamente la influencia hidrológica del talado de los bosques tropicales sobre la escorrentía, utilizando los testimonios publicados, resultantes de las experiencias científicas y sus cuantificaciones en la literatura reciente.

Para analizar las consecuencias hidrológicas en el paisaje tropical húmedo al ser disturbado por el hombre, deben tratarse en conjunto las ideas que definen el clima tropical, los suelos, el efecto de las pendientes, la pluviosidad, la escorrentía, la infiltración, el almacenamiento, el agotamiento gradual de la humedad del suelo, la vegetación y el arrastre de los suelos. Será de importancia el conocimiento de las variaciones de estos componentes, frente a la acción humana, y su sensibilidad. Este planteo debe ser cuantificado, superando las dificultades para efectuar mediciones. Ha habido en los últimos años muchas investigaciones que brindan resultados numéricos, obtenidos de experimentos que son citados en la bibliografía adjunta.

* Presentado a las Sesiones Científicas Dr. Abel Sánchez Díaz, 1983. Temas para la Educación Ambiental. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

1. Análisis de la influencia hidrológica de las componentes del paisaje tropical húmedo.

1.1. *Clima*

Como en este artículo estamos tratando la sensibilidad de los fenómenos frente al impacto de la tala de bosques, cabe señalar que entre todas las características del clima la limitante del crecimiento vegetal en esos lugares no es ni la temperatura, ni el agua, sino el estado del suelo. Las lluvias tropicales son típicamente cortas; sobrevienen como intensas tormentas, caracterizadas por una relativamente alta dimensión mediana de la gota y por lo tanto por una alta carga de energía total (Lal, 1983).

El fenómeno de la lluvia, su intensidad, duración, volumen y frecuencia, no es alterado, aparentemente, salvo en muy pequeña escala, cuando se arrasa la selva que cubre el suelo, ya que sus causas corresponden a un espacio más amplio que el de la selva arrasada.

1.2. *Relieve*

Las características de la cuenca hidrográfica que influyen sobre el escurrimiento superficial directo son, entre las más importantes, el área de la cuenca, la pendiente, la forma de la cuenca y la densidad de drenaje (Pfafstetter, 1976). Además, las alteraciones de la profundidad de los ríos (principal y efluentes) provocadas artificialmente por diques de embalse, también cambian el escurrimiento superficial directo (Klemes, 1973; Fuschini Mejía, 1979).

Es importante notar que estas características no cambian cuando el terreno sufre una deforestación, al igual que vimos en el caso del clima.

1.3. *El suelo y la vegetación*

Es conveniente recordar las teorías sobre el origen de la formación de los suelos, en particular la expresada por Jenny (1941) dividiéndolo en cinco factores, pues la naturaleza del suelo y de la vegetación, tienen marcada influencia en las características de las crecidas, en particular el fenómeno de infiltración y de almacenamiento en el suelo, para lo cual es importante su espesor y el fenómeno del agotamiento gradual de la humedad (depleción).

Un mismo suelo puede comportarse de manera distinta en lo relacionado con la escorrentía, si se mantiene la vegetación natural o si se la elimina. Una observación en la selva brasilera indica que una vegetación densa, causa mayor pérdida por transpiración resultando un menor escurrimiento total de la cuenca. Para un mismo tipo de suelo y condiciones climáticas semejantes, un área con densa vegetación proporciona una distribución de escurrimientos regulares a lo largo del año,

disminuyendo las crecidas y aumentando la descarga-base en los estiajes, siendo además la escorrentía total menor que en el caso de un suelo descubierto por causa de las grandes pérdidas por transpiración (Pfafstetter, 1976).

La naturaleza del suelo está íntimamente relacionada con las condiciones antecedentes de las precipitaciones, que influyen en la humedad del suelo en el inicio de los chubascos y en consecuencia de las pérdidas por infiltración. Esas condiciones antecedentes disminuyen su importancia cuando el suelo es muy permeable, pues siempre está seco al iniciarse el chubasco, independientemente del transcurso de los chubascos anteriores.

El mecanismo de almacenamiento en el suelo por infiltración, inmediatamente después del chubasco, es facilitado por los árboles y animales cavadores que viven en la selva natural, aunque los componentes del suelo indiquen baja permeabilidad (presencia de arcilla). Pero hay otros mecanismos de fundamental importancia y es que esa permeabilidad añadida, en los lugares selváticos, y el almacenamiento correspondiente, es continuamente desagotada por elementos vivos, que apenas termina el chubasco, o aún antes, comienzan a transpirar, retirando agua del suelo y enviándola a la atmósfera (en conexión con el poder evaporante de la misma, que es grande en las zonas cálidas y con los leves movimientos del aire), retirándola de la escorrentía y sobre todo dejando el suelo con capacidad suficiente para almacenar el próximo chubasco.

Hemos visto antes, que las lluvias tropicales son cortas, o sea que, aunque el período de lluvia sea largo, la zona con selva natural funciona como un inmenso *embalse areal*, continuamente vaciado en forma automática por medio del "bombeo biológico" de los árboles, lo que da una renovada capacidad de almacenamiento a lo largo de la época lluviosa. Ello se traduce en que el coeficiente de escorrentía instantáneo se mantiene bajo, mientras se desarrolla el período lluvioso. Por consiguiente el coeficiente de escorrentía mensual o anual será bajo.

Si se elimina la selva, además de desaparecer la intercepción que retira agua del ciclo evaporándola antes de llegar al suelo, también éste sufre transformaciones, pues al quedar desnudo, sufre el impacto mecánico de las gotas que, tal como hemos visto son grandes. Como consecuencia el suelo se compacta, sobre todo en la capa superior y se impermeabiliza. Esto se traduce en una menor capacidad de almacenamiento, pero sobre todo, en una menor velocidad en el agotamiento gradual de la humedad por falta de evapotranspiración de los árboles. El volumen que puede infiltrarse no se retira, salvo en lo que se refiere al pequeño escurrimiento hipodérmico y entonces el área se puede saturar y el coeficiente de escorrentía instantáneo irá aumentando a lo largo del período lluvioso. El coeficiente de escorrentía mensual será mayor en la zona deforestada que en la que mantiene la selva natural tropical.

El experimento de Ming Chang (1983) ratifica numéricamente los ejemplos anteriores. En un período de estudio, desde el 28 de mayo de

1980 hasta el 26 de junio de 1982, observando la humedad del suelo y sus variaciones a distintas profundidades, durante un lapso de 790 días en el que ocurrieron 130 tormentas, en zonas contiguas, una con la selva natural y otras deforestadas de diferentes maneras e incluso una cultivada, se llegó a que el promedio de contenido de humedad en el perfil total del suelo de 0 a 1,35 m, durante el período de estudio, fue 0,292 g/cm³ para el terreno no disturbado y 0,492 g/cm³ para el mismo terreno cultivado. Estos son valores promedio del contenido de humedad obtenidos, en el caso del suelo bajo la selva, como promedio de una sucesión de grandes contenidos y bajos contenidos, y en el caso de suelos disturbados como promedio de una sucesión con menos variaciones. Los coeficientes de variación del contenido medio de humedad del suelo, entre 0 y 1,35 m fueron 0,144 para la selva natural y 0,085 para el mismo suelo deforestado y posteriormente cultivado según lo observado en el experimento de referencia.

Lo anterior implica que la extracción debida a las raíces de los árboles incrementa la capacidad de recarga. Puede pensarse como un índice de la permanencia del volumen de poros recargables sucesivamente en el suelo de la selva no disturbada, en exceso con respecto al mismo terreno cultivado. Es decir, que a lo largo de los 790 días hay una permanencia de capacidad de recarga en esa capa del suelo de 0,200 g/cm³ más, en la selva no disturbada que en la cultivada (fig. 1).

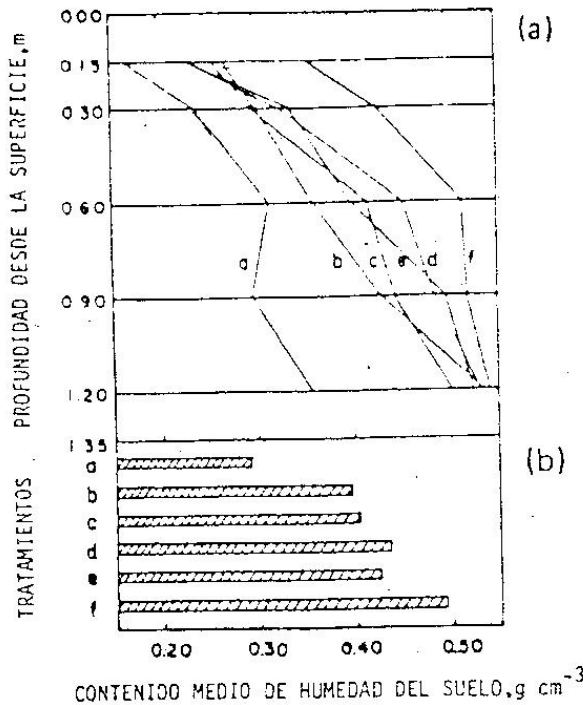


FIG. 1. — Contenido de humedad del suelo bajo seis tratamientos diferentes; a) en cinco profundidades medidas y b) el perfil entero del suelo, 0-1,35 m. Tratamientos a, b, c, d, e, f (ver cuadro 6), (Ming Chiang, 1983).

Ello es así por el juego de las curvas de agotamiento gradual de la humedad del suelo en función del tiempo, que mantiene baja la humedad en el suelo, sobre todo en su parte superficial, más tiempo durante el año en los suelos bajo la selva que en los deforestados. Esa diferencia de $0,200 \text{ g/cm}^3$, multiplicada por el espesor del suelo, que en el experimento de Ming Chang era $1,35 \text{ m}$ y por la superficie del área disturbada, da el volumen del agua que estuvo almacenada en el suelo, y vaciado inmediatamente por la actividad biológica, pero no indica cuántas veces ocurrió ese fenómeno. Puede pensarse que a lo largo del año fueron dos o tres veces. De todos modos ello puede calcularse con las ecuaciones de la curva de agotamiento gradual de la humedad del suelo y el registro de las lluvias acaecidas. La curva de agotamiento gradual de la humedad del suelo es igual a $\theta_t = k \theta_{t-1}$ (fig. 2, Ming Chang, 1983), donde:

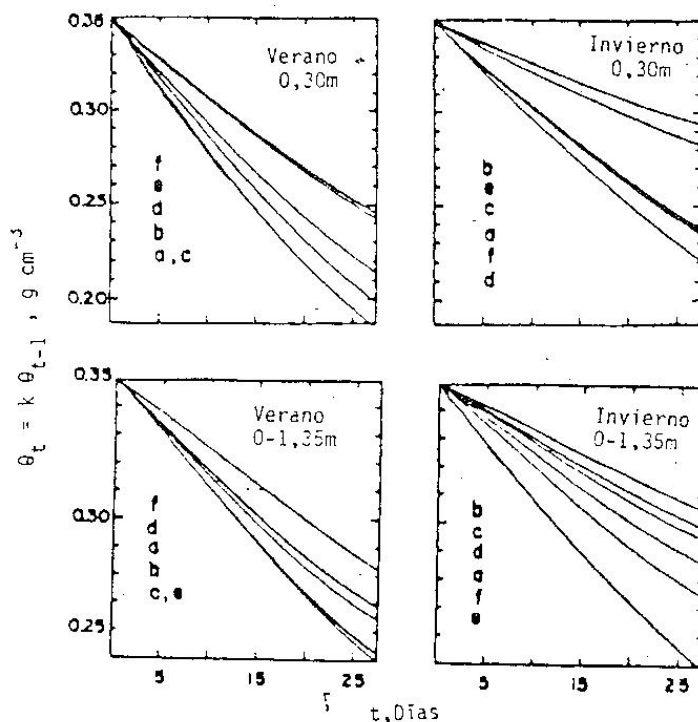


FIG. 2. — Abatimiento de la humedad del suelo estimadas por $\theta_t = k\theta_{t-1}$ para seis condiciones (ver cuadro 6) silviculturales en Este Húmedo de Texas. (Ming Chang, 1983).

θ = contenido de humedad (g/cm^3);

t = tiempo en días;

k = coeficiente de depleción o agotamiento o abatimiento.

Esto fue obtenido experimentalmente por el investigador antedicho. Los números anteriores se refieren a una profundidad de $1,35 \text{ m}$. Sin embargo Rutter (1968), analiza el consumo de agua en la selva e indica que las raíces en selvas tropicales, en Kenya, pueden llegar a más de

3,60 m. En esas condiciones una lluvia anual de más de 1.000 mm implica una evaporación anual de 965 mm, o sea un coeficiente de escorrentía de 0,12.

Es probable que la capacidad de almacenamiento añadida de 0,200 g/cm³ del terreno con selva con respecto al deforestado, se mantenga utilizando una zona de suelo con mayor profundidad de raíces, lo que daría un volumen de permanencia de vacío mayor, pero ello debería comprobarse con experimentos equivalentes al citado, o realizarse en las zonas con mayor profundidad de raíces. De todos modos, el experimento demuestra que entre los elementos físicos condicionantes del movimiento del agua en el ciclo hidrológico, uno muy importante es esa característica de las zonas selváticas de vaciar el suelo continuamente durante el año, que desaparece al ser eliminada la selva. El fenómeno puede ser cuantificado por medio de experimentos desarrollados en pocos metros cuadrados, pero nada impide extender sus resultados a superficies sustantivamente más amplias con suelos análogos, pues ese fenómeno no depende de la superficie de la cuenca. Susmel (1969) llega a las mismas conclusiones referentes a la validez de los experimentos en superficies pequeñas, cuando se trata del análisis de sensibilidad.

Por lo anterior, queda claramente expresado que tanto el suelo, en sus características de estructura, químicas, funcionamiento hidrológico y resistencia a la erosión, como la vegetación y vida animal como masa biótica que está en equilibrio ecológico, son alterados profundamente cuando se elimina la selva. Esa alteración incide en el funcionamiento hidrológico de la cuenca boscosa tropical húmeda, en particular, en su coeficiente de escorrentía.

1.4. *Escorrentía*

El experimento de Ming Chang (1983), incluyó el análisis de 33 tormentas (donde determinó la lluvia neta, o sea tomó en cuenta la intercepción), su escorrentía, el arrastre de sedimentos y el contenido de humedad antecedente del suelo en 30 cm de profundidad para cada uno de 6 tratamientos silviculturales diferentes durante el período de estudio. En el cuadro 1 se muestran los valores medios, máximos y mínimos de esas cuatro variables, obtenidos con un completo equipo de medida.

Confirmando los resultados de los análisis descriptos más arriba, referentes a la secuencia de precipitación, almacenamiento en el suelo y evaporación, se ve en el cuadro 1, que tanto la escorrentía superficial como el arrastre de sedimentos son menores en la selva natural y se incrementan cuando se incrementa el grado de perturbación del suelo y la vegetación. Tal como lo sostiene Ming Chang (1983), "La escorrentía superficial ocurre sólo cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad máxima de infiltración del suelo. En este caso la tasa

CUADRO 1. — Medios y rangos de la lluvia neta, escorrentía superficial, sedimento y humedad antecedente del suelo de 33 escorrentías producidas por las tormentas en el lapso mayo 1980-julio 1982, cerca de Nacogdoches, Texas. (Ming Chang, 1983)

Tratamiento (ver cuadro 6)	Lluvia neta mm	Escorrentía mm	Sedimento kg ha ⁻¹	Humedad del suelo antecedente gcm ⁻³
(a)	21,8 (2,62-159,54)	0,64 (0,0-12,64)	0,426 (0-4,30)	0,238 (0,110-0,368)
(b)	22,9 (3,22-164,14)	1,44 (0,0-14,04)	0,889 (0-8,50)	0,306 (0,160-0,405)
(c)	25,6 (4,04-179,16)	2,05 (0,0-14,49)	6,20 (0-111,30)	0,297 (0,096-0,474)
(d)	26,8 (4,4-186,44)	4,81 (0,09-38,16)	18,55 (0,1-133,40)	0,345 (0,174-0,461)
(e)	26,8 (4,4-186,44)	7,12 (0,1-54,71)	143,26 (0,1-979,10)	0,341 (0,247-0,527)
(f) *	29,5 (4,4-186,44)	14,09 (0,1-152,85)	349,49 (0-1395,60)	0,423 (0,329-0,518)

* Basado en datos de 34 tormentas.

real de infiltración es igual a la capacidad máxima de infiltración y el agua escurre sobre la superficie del terreno”.

Basado en los datos de 33 tormentas, la escorrentía superficial R_o en mm está relacionada a la lluvia neta (Pt mm) en la manera óptima, en las formas que se muestran en el cuadro 2. Estas ecuaciones muestran que alrededor del 8, 10, 10, 21, 31 y 40 % de la lluvia neta escurre como escurrimiento superficial, respectivamente, en cada uno de los seis tratamientos silviculturales.

El autor antes citado agrega: “La constante negativa de cada ecuación implica la recarga media inicial de humedad del suelo para cada tratamiento. Para que se produzca escorrentía de superficie es necesaria una lluvia neta de más de 13,40 mm; 8,13; 4,20; 3,82; 3,43; y 6,53 mm en el orden de los tratamientos que utilizamos. La parcela cultivada tiene un valor 6,53 de máxima recarga inicial de humedad, mayor que la parcela cortada comercialmente 4,20 y ello parece anómalo. La

CUADRO 2. — Basado en datos de 33 tormentas, la escorrentía superficial (R_o , mm) está mejor relacionada a la lluvia neta (Pt, mm) en las siguientes formas: (Ming Chang, 1983)

Tratamiento (ver cuadro 6)		
(a)	$R_o = -1,0115 + 0,0755Pt$	($R^2 = 0,88$)
(b)	$R_o = -0,8454 + 0,1040Pt$	($R^2 = 0,62$)
(c)	$R_o = -0,4378 + 0,1044Pt$	($R^2 = 0,48$)
(d)	$R_o = -0,8007 + 0,2095Pt$	($R^2 = 0,83$)
(e)	$R_o = -1,0456 + 0,3050Pt$	($R^2 = 0,86$)
(f)	$R_o = -2,6918 + 0,3962Pt + 0,00025Pt^2$	($R^2 = 0,96$)

Estas ecuaciones muestran que alrededor de 8, 10, 10, 21, 31 y 40 % de la lluvia neta ocurren como escorrentía superficial en el terreno con tratamientos a, b, c, d, e, f, respectivamente.

parcela cultivada lo fue 8 veces en la dirección de la pendiente durante el período de dos años. Inmediatamente después de cada cultivo el suelo era esponjoso y la infiltración alta; para pequeñas tormentas la escorrentía superficial era menor que en la parcela con tratamiento e). Esta situación fue gradualmente revertida en cuanto el suelo se asentaba y los vacíos eran sellados por las partículas del suelo erosionado”.

Las respuestas de los tratamientos silviculturales a la lluvia pueden ser mejor ilustradas por los hidrogramas de superficie producidas por una tormenta de dos picos de 176,53 mm, desde el 31 de agosto al 1º de septiembre de 1981 (la más duradera y la más intensa registrada en el período de estudio) y una tormenta de 9,91 mm que ocurrió 22 horas después (fig. 3). El total de la escorrentía superficial producida por las

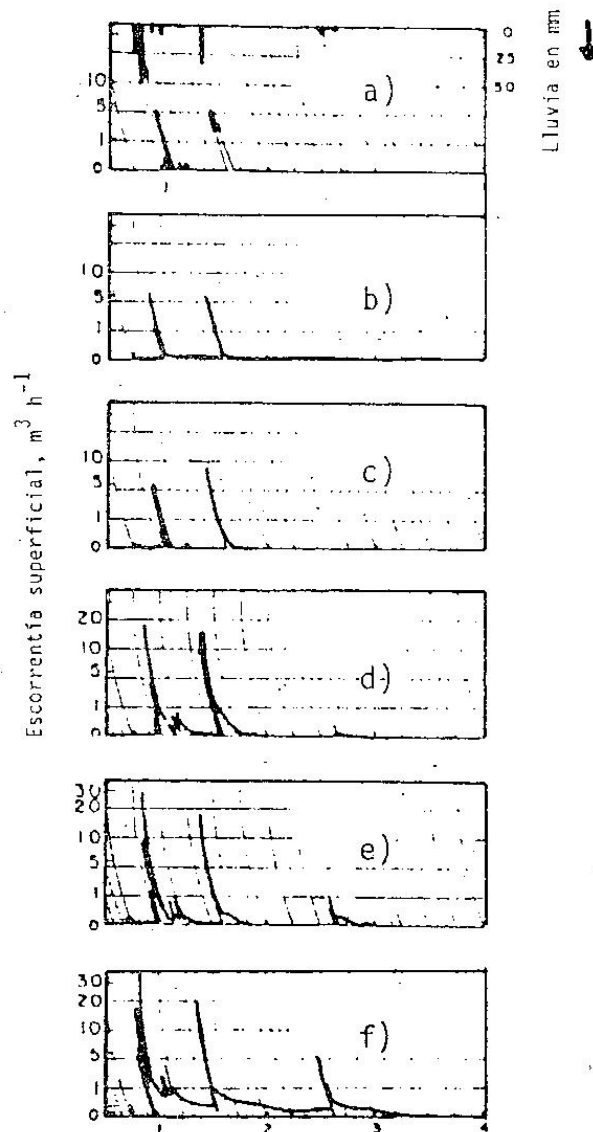


FIG. 3. — Hidrogramas de escorrentía superficial generados por dos tormentas sucesivas de 186,44 mm, comenzando a las 23.00 horas del día 31 de agosto y terminando a las 21.00 horas del 2 de septiembre de 1981 cerca de Nacogdoches, Texas (Ming Chang, 1983).

dos tormentas sucesivas fue de 12,64 mm (6,8 % de la lluvia), 14,04 (7,5 %), 14,49 (7,8 %), 38,16 (20,5 %) 54,71 (29,3 %) y 152,83 (82,0 %) para los tratamientos A-F respectivamente. Alrededor de 122,68 mm de lluvia cayeron en las primeras 3 horas, una intensidad equivalente a un período de retorno de 25 años en el área de estudio. Los picos de escurrimiento se ordenaron con una tasa equivalente a 4,83 m³/h en la foresta no perturbada hasta 32,62 m³/ en la cuenca cultivada.

En cada una de las seis cuencas hubo un pico de escorrentía secundario en respuesta al pico de lluvia que comenzó 15 horas después del comienzo de la tormenta, todos ellos se aproximaron a o excedieron la altura del pico inicial, aunque el monto de la lluvia fue solo 28 % de la ocurrida en las 3 horas iniciales. Esto indicó la baja de la capacidad de almacenamiento en el momento del segundo pico de lluvia

Sólo los tratamientos con poca cubierta vegetal produjeron una escorrentía apreciable en la segunda tormenta. Las diferencias en el volumen de la escorrentía y en el caudal (tasa de flujo) generado por las dos tormentas también produjeron diferencias significativas en el movimiento de sedimentos entre los seis tratamientos. El sedimento total producido por las tormentas, incluyendo el suspendido y el depositado, fue 1,36 kg Ha⁻¹; 1,05; 5,08; 96,45; 341,21; y 1250,3 kg Ha⁻¹ para las parcelas respectivamente tratadas en las formas a, b, c, d, e y f. Las relaciones entre los sedimentos de los primeros cinco tratamientos con respecto al último tratamiento (el cultivado) fueron: 0,00109; 0,00084; 0,00406; 0,07714 y 0,27289 en este orden.

2. Elementos para la interpretación hidrológica de la crecida excepcional 1982-1983 en el Río Paraná

El río Paraná es el desagüe natural de una parte importante de la Cuenca del Plata. En el año 1982/83, acaeció una crecida, que en algunos puntos superó las máximas conocidas. El origen de estas crecidas, 1982/83 y las anteriores, está en la intensidad y volumen de las lluvias que se precipitan especialmente en territorio brasilero. No se tienen estadísticas suficientemente detalladas y de largo período en la zona selvática, por lo cual, afirmar que hay una correspondencia biunívoca entre las crecidas y las lluvias, manteniendo constante la función de transferencia lluvia-caudal, lleva a una gran incertidumbre. Se supone que la perturbación atmosférica, que también se supone, es causada por la corriente del Niño, fue mayor en esta última oportunidad que en otras anteriores. Corresponde observar que en algunas estaciones de largo registro (puntuales) las lluvias correspondientes a ese período fueron menores en esa oportunidad que en ocasiones anteriores.

Cabe entonces considerar que el intenso arrasamiento del bosque ha modificado la función de transferencia lluvia-caudal y, por lo tanto, para producir una crecida de determinado volumen, puede ser necesario ahora, con el bosque arrasado, una lluvia de menor dimensión que en ocasiones anteriores con la selva virgen, pues ha sufrido un aumento el coeficiente de escorrentía instantáneo y sobre todo el mensual.

Se cuenta con cuatro elementos para encarar la comparación entre esa crecida y la que hubiera ocurrido si no se hubiera deforestado, correspondiendo estrictamente a la misma lluvia y a la misma superficie del terreno, que son eliminados en las ecuaciones. Dichos elementos son: 1) el registro histórico de la crecida y su volumen; 2) la historia del arrasamiento del bosque y su superficie; 3) un mapa de suelos; 4) la comparación cuantificada del efecto de la tala del bosque natural con respecto al terreno virgen. Con el resultado de esa comparación podemos inferir la influencia que la tala de bosques tiene en los caracteres de la crecida. Por supuesto, que éste es sólo un ejercicio de comparación. Serían necesarios más experimentos en la zona de estudio, pero los números que obtenemos son indicativos de que esa influencia existe y es grande. Las ideas sobre la existencia de esa influencia, es apoyada por el hecho objetivo de que el arrastre sólido de los ríos Paraná y del Uruguay, ha aumentado sensible y continuamente a lo largo de la historia de las crecidas de este siglo. Y ello lo conocemos indicativamente por el aumento de los volúmenes que deben dragarse en muchos puntos del así llamado Litoral Argentino (ríos Paraná y Uruguay)

También sirve como indicativo, la pérdida de transparencia del río Uruguay que ha acaecido en el lapso de una vida. Como el fenómeno de aumento de arrastre de sedimentos tiene el mismo origen (la tala del bosque) que el aumento de la escorrentía, el aumento de la primera nos confirma que debe haber un aumento de la segunda (cuadro 1).

2.1. Deforestación en la Cuenca del Plata

En el cuadro 3 originado por técnicos de la FAO, vemos que la deforestación ocurrida en la Cuenca del Plata, es de aproximadamente 55.000.000 de hectáreas, de las cuales están bajo cultivo 28.000.000 de hectáreas según Kugler (1938).

Los procedimientos de deforestación fueron violentos desde el principio de la ocupación humana y están comprendidos en las categorías que Ming Chang coloca en las categorías b, c, d, e, f (cuadro 6), sobre todo desde que se utilizan tractores. Víctor Moraes (1968) muestra mapas evolutivos de gran interés. En el informe del BID (1983) se indica que la deforestación en todo Brasil avanza 1.360.000 hectáreas por año y se replantan 158.000 Ha por año, con todos los efectos negativos que tiene un monocultivo en la evolución de la fertilidad del suelo, según indica Nock (1969). Este autor califica a éstos de bosques muertos.

CUADRO 3. — Avance de la deforestación en la Cuenca del Plata.

	Período	Superficie (ha)	Remanente % Superficie Total	Deforestación* (ha)	Observaciones
Argentina	Misiones 1900-1973	968.000	66%	78.000	Sólo 30.000 Ha cultivos. 204.000 cultivos permanentes. El resto es vegetación secundaria.
	N.O.A. 1975-1979	320.000	—	—	200.000 Ha poroto/año: área desmontada entre 1900-1975. Estimada en 500.000 Ha.
Bolivia	Santa Cruz 1950-1980	480.000	—	—	En el pedemonte de la Sierra de Santa Cruz
	Sur Este 1960-1980	40.000	—	—	Incluye región Yacuiba-Chaqueña
Brasil	Sao Paulo 1930-1980	9.400.000	4%	3.060.000	Primitivamente (1860) 82 % estado forestado. Avance empieza en año 1910. En 1973, 8,3 % superficie todavía forestada
	Paraná 1940-1980	16.000.000	5%	600.000	Primitivamente 85 % del estado forestado. Avance empieza año 1930
	Sta. Catalina 1940-1980	3.940.000	8%	425.000	
	Río Grande Do Sul 1930-1980	11.600.000	15%	—	Primitivamente 46 % del estado forestado. Avance frontera agropecuaria también en praderas naturales (no computado)
Paraguay	Minas Gerais 1960-1980	1.500.000	2%	500.000	En 1960, 7 % de la superficie estaba todavía forestada
	Matto Grosso Do Sul 1970-1980	2.000.000	—	—	Un avance de 200.000 Ha/año estimado de acuerdo a fuentes no oficiales
	Región Oriental 1972-1979	830.000	—	—	El ritmo de desmonte es de 100.000 Ha/año

* Mayormente con especies de crecimiento rápido: pino y eucalyptus.
Fuente: Recopilación de datos disponibles (FAO).

(pág. 68) y el gobierno brasileño, por ley, pide que se planten especies nativas aunque sólo en una proporción del 1 % (pág. 67). Nock cita los trabajos de Maack (1968) donde se relata lo ocurrido desde 1964, referente a los daños por erosión y cambios en la economía del agua.

2.2. Deforestación en la Cuenca Paraná-Iguazú.

La Cuenca del Paraná, hasta la confluencia con el Iguazú, tiene una superficie de 840.000 km². Si se le añaden 67.000 km² de la Cuenca del Iguazú harán un total, en Puerto Iguazú, de 907.000 km²

Según el informe de la crecida del Paraná de la Consultora Motor

Columbus (1979), la precipitación media del Iguazú es de 1.520 mm, la descarga anual de 1.600 m³/s, equivalente a 760 mm y el coeficiente de escorrentía es de 0,50. En el Alto Paraná, hasta Guayrá, la precipitación es de 1.400 mm, la descarga anual 9.200 m³/s, equivalente a 340 mm y el coeficiente de escorrentía es de 0,24. En el informe mencionado se dice que el pico máximo de crecida fue 34.000 m³/s en Guayrá.

La crecida máxima del Iguazú registrada en el período histórico conocido era de 25.000 m³/s y ahora en 1983 fue superada, estimándose en aproximadamente 30.000 m³/s.

En octubre de 1982 el autor efectuó con Gaviño Novillo J. la nivelación de las marcas dejadas en los árboles en las cercanías de la Escala Tipo, obteniendo que el agua llegó a la cota 188,59 m.s.n.m. Cota del 0 de la escala 180,5 correspondiente a 8,04 m sobre el 0 de la escala.

La superficie deforestada está indicada en el cuadro 3, FAO (1983). Tomando de esas cuencas la parte que incluye los Estados de San Pablo, Minas Gerais, Matto Grosso do Sul, Paraná, Santa Catalina, el Paraguay, la Provincia de Misiones en Argentina, se llega a la conclusión que han sido deforestados 350.000 km², o sea aproximadamente el 40 % de la superficie, quedando el 60 % con su vegetación natural (557.000 km²). Se ha deforestado principalmente la parte sur, que es la que produce el mayor aporte al Iguazú y al Paraná y por ello las alteraciones en la escorrentía, producida por la tala de los bosques puede esperarse que sean mayores. Los mapas de suelos y de la vegetación natural publicados por la OEA (1969) son parte integrante de la información básica necesaria para las investigaciones capaces de llevar a una formulación teórica y explicar la influencia que la deforestación tiene en el aumento de la escorrentía de esas cuencas.

2.3. Crecida del Río Paraná 1982/83

En el cuadro 4 se han anotado 16 secuencias de alturas en el río Paraná en Corrientes, con el caudal correspondiente obtenido, utilizando la curva altura-caudal. La primera lectura corresponde a julio de 1982, valor que ya corresponde a una crecida; en la segunda, de noviembre de 1982, el pequeño valor fue producido por el cierre de Itaipú, que cortó la onda de crecida. En el cuadro 5 se han anotado sólo los picos, que son 11 en Iguazú y Posadas y 6 en Corrientes, entre el 3 de diciembre de 1982 y el 31 de julio de 1983. En Iguazú, el 0 del Limnógrafo de Ita Cajón es 79,18 m, o sea que la cota máxima alcanzada allí correspondiente a la lectura 48,04, el 10 de julio de 1983 fue de 127,22 m sobre el 0 del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Fuschini Mejía (1979) ha señalado que la cota del 0 de la Comisión Mixta Técnica Paraguaya Brasileña (CMT) se hallaba 71 cm por debajo del 0 del IGM. Es decir, que la lectura de la escala, si se refiere al 0 de la CMT daría 127, 93 m sobre el 0 de la CMT. La crecida máxima del año 1905 estaba 127,67 sobre el 0 de la CMT o sea que

CUADRO 4. — *Secuencias cronológicas de alturas y caudales crecidas 82-83 en Corrientes - Observaciones de Agua y Energía*

Número orden	Fecha	Altura metros	Caudal m ³ /seg	Volumen mensual de los crecidas en Corrientes (82-83)		
				Año	Mes	Km ³
1	27-7-82	7.27	—			
2	1-XI-82	2.86	—			
3	30-XI-82	7.14	—			
4	13-XII-82	7.80	42.300			
5	2-II-83	7.23	36.300	1983	Noviembre	—
6	5-III-83	8.39	49.300	1982	Diciembre	107
7	22-IV-83	7.02	34.700	1983	Enero	100
8	28-V-83	8.70	54.500	1983	Febrero	96
9	10-VI-83	8.26	47.350	1983	Marzo	122
10	23-VI-83	9.00	58.800	1983	Abril	96
11	7-VII-83	8.01	44.550	1983	Mayo	126
12	18-VIII-83	9.04	60.000	1983	Junio	135
13	31-VII-83	5.70	27.000	1983	Julio	132
14	Sept. 83	5.12	—	Volumen total		914
15	Sept. 83	5.12	—			
16	Octub. 83	6.45	—			

en 1983 se superó el nivel aproximado de la crecida máxima histórica de 1905. En Posadas, con cota del 0 de 73,09 sobre IGM hubo también 11 picos entre el 5 de diciembre de 1983 con cota máxima el 12 de julio: 80,18 que correspondería a la lectura 7,09 de la escala. En Posadas, el máximo histórico era de 7,32 (1905) en Corrientes con cota del 0 igual a 41,40 sobre el 0 del IGM, hubo seis picos entre el 13 de diciembre de 1982 y el 31 de julio de 1983 con cota máxima el 31 de julio de 1983 de 50,45, correspondiente a una altura de 9,04. La máxima histórica era de 50,02 en junio de 1905 con una altura de 8,56 sobre el 0 (cuadros 4 y 5).

Esta conformación, con picos tan diferenciados, que aparece más notable cuando se consignan los valles entre picos, indica la forma de

CUADRO 5. — *Datos de crecida y valores instantáneos 1982-1983 - Culminaciones (Picos)*

0 - IGM		Posadas			Corrientes		
79,18	ITA-Cajón	0-IGM	73,09	0-IGM	41,40		
Fecha	Altura	Fecha	Altura m	Caudal m ³ /s	Fecha	Altura m	Caudal m ³ /s
3-XII-82	39,60	5-XII-82	5,30	33.580	13-XII-82	7,80	42.300
10-I-83	34,70	11-I-83	4,40	27.585	—	—	—
26-II-83	40,57	1-III-83	6,27	40.458	5-III-83	8,39	49.300
21-III-83	40,15	22-III-83	5,55	35.311	—	—	—
1-V-83	35,58	3-V-83	5,06	31.945	28-V-83	8,70	54.500
13-V-83	40,10	14-V-83	5,63	35.871	—	—	—
22-V-83	43,83	23-V-83	6,17	39.729	—	—	—
31-V-83	38,25	1-VI-83	5,18	32.759	23-VI-83	9,00	58.800
14-VI-83	46,78	16-VI-83	6,69	43.571	—	—	—
10-VII-83	48,04	12-VII-83	7,09	46.610	18-VII-83	9,04	60.000
28-VII-83	42,40	29-VII-83	5,09	32.148	31-VII-83	9,05	—
						5,70	—

Volumen: 685.000 Hm³

Volumen: 914.000 Hm³

funcionar de la cuenca deforestada con el suelo fácilmente saturable, con chaparrones tropicales y embalses en los ríos principales que aceleran la onda de crecida, por lo que el tiempo de concentración en cada cuenca de aporte es muy pequeño y la onda sólo se amortigua entre Posadas y Corrientes desapareciendo solo 5 culminaciones. Cabe indicar que en Corrientes, el 27 de julio de 1982 hubo 7,27 m sobre el 0 de la escala; a fines de agosto de 1982: 5,63 m sobre el 0; el 29 de septiembre de 1982: 6,45 m sobre el 0; el 1º de noviembre 2,86 m sobre el 0; el 30 de noviembre 7,14 m sobre el 0.

Esta secuencia de alturas en Corrientes indica que el río comenzó a crecer en julio de 1982 y esa onda de crecida se cortó con la brusca bajante provocada por el cierre de Itaipú, que tuvo que almacenar 20 km³ de los 30 km³ que tiene de capacidad el 13 de octubre de 1982, retirando ese volumen al río Paraná; por ello desaparecieron los picos de octubre y noviembre en Posadas, es tan baja la altura del 1º de noviembre de 1982 en Corrientes y vuelve a crecer el 30 de noviembre de 1982 en Corrientes (cuadro 4).

El volumen de la crecida fue estimado en Posadas de 685.000 Hm³, desde el 1º de diciembre de 1982 hasta julio incluido y en Corrientes de 914.000 Hm³, también desde el 1º de diciembre, es decir con una permanencia de ocho meses.

Probablemente, lo riguroso para un estudio hidrológico sea sumar la parte de crecida que comenzó en julio de 1982 y que no escurrió porque se almacenó en Itaipú vacío, o sea que lo correcto, sería hablar de una duración de crecida de 12 meses, lo cual demuestra su excepcionalidad. En lo que sigue se utilizará de todos modos una duración de 9 meses.

2.4. *Análisis de la influencia de la deforestación en la crecida*

2.4.1. Como ya se ha dicho, este tema es objeto de controversias. Toda la comunidad científica está de acuerdo en que la deforestación aumenta el volumen del material sujeto a la erosión y por lo tanto la sedimentación en los cauces. Según informes del ingeniero Petralli de la Dirección Nacional de Obras Portuarias y Vías Navegables de la República Argentina, en la zona de navegación del Río Paraná y en el Canal Mitre, la sedimentación anual es de 15.000.000 m³ y en 1983 se debían dragar 30.000.000 m³. El volumen de material sedimentado en el año 1983, excepcional, ha sido mucho mayor, pues en la estimación de Petralli no se incluye el material depositado sobre las islas y las márgenes que ocurrió sólo ese año.

Estos datos hacen resaltar la importancia notable del efecto protector de la cubierta del suelo: Es decir que si ella se retira al deforestar, aumenta el volumen del terreno erosionado y por lo tanto el volumen del material sedimentado. En Brasil se lucha en una pequeña

El volumen escurrido si no se hubiera deforestado:

$$C_2 \cdot 0,60 \cdot S \cdot P + C_1 \cdot 0,40 \cdot S \cdot P = V';$$

Volumen que se incrementa al deforestar:

$$P \cdot S \cdot (C_2 - C_1) \cdot 0,40 = (685 - V') = \Delta V;$$

Por otro lado la lluvia total es igual:

$$P = \frac{685}{(C_1 \cdot 0,60 + C_2 \cdot 0,40) \cdot S}$$

Reemplazando:

$$V = \frac{(C_2 - C_1) \cdot 0,40 \cdot 685}{(C_1 \cdot 0,60 + C_2 \cdot 0,40)}$$

Esto sería rigurosamente cierto si toda la superficie deforestada tuviera el mismo suelo y el mismo tratamiento, esa parte cambiaría de C_1 a C_2 . El tratamiento empleado se justifica porque el cálculo anterior no es una lluvia, ya que en una cuenca muy grande no sería aplicable el unalluvia, ya que en una cuenca muy grande no sería aplicable el método racional ni el de Hidrograma unitario. El objetivo es conocer cuál sería el incremento negativo si no se hubiera deforestado la cuenca, conociendo el volumen de la crecida y simplificando la superficie de la cuenca, considerando el peso de la zona deforestada o no y simplificando la lluvia. El método de cálculo anterior está justificado pues la lluvia hubiera sido la misma, su distribución y su integral, y vale la simplificación de las fórmulas anteriores pues se la elimina, y hubiera tenido las características de chubascos espaciados como indicó Pfafstetter (1957). Parece posible la extensión a una cuenca tan grande como la del Paraná deforestada, justamente porque la deforestación ha sido total, y necesariamente ha cambiado la función de transferencia de lluvia-caudal de pequeños y grandes chaparrones.

Avala este criterio la forma tan particular que han tenido los picos de crecida sucesivos y especialmente el comportamiento del río Iguazú, que si antes era de respuesta rápida, ahora es mucho más rápida.

La cuenca se ha torrencializado por la deforestación y los embalses. He tratado esta cuestión con hidrólogos de prestigio como G. Kovacs y C. E. Custodio. Kovacs considera correcta esa afirmación aunque en un balance muy largo no está seguro que aumente la escorrentía, lo cual es compatible con el hecho de que aumente el volumen correspondiente a la crecida disminuyendo el volumen correspondiente al estiaje. Custodio considera que se pueden extender los resultados de los experimentos de Min Chang, efectuados en pequeñas parcelas para deter-

proporción contra la erosión utilizando el cultivo en terrazas. Lal (1983) indica que se obtiene ciertamente éxito contra la erosión, en un tratamiento de cultivo en terraza y manteniendo la cubierta vegetal. Pero es notable que la escorrentía incrementada al deforestar no se disminuye al adoptar las terrazas.

2.4.2. La actividad biológica de la selva, que funciona entre chaparrón y chaparrón, abate la humedad del suelo por medio de la evapotranspiración. De este modo aumenta la capacidad de recarga del suelo. Al deforestar el suelo saturado después de un chaparrón, no pierde agua por evapotranspiración permaneciendo saturado. El siguiente chaparrón, que al no ser interceptado por el dosel del bosque cae directamente sobre el suelo con hierba o desnudo encuentra el suelo saturado, y por lo tanto escurre, Ming-Chang (1983) encontró, por medio de un estudio estadístico, que la diferencia del promedio del contenido de humedad del suelo, entre el terreno cultivado y el no disturbado, fue de 0,20 g/cm³ de humedad promedio a lo largo de dos años, en una capa de 1,35 m de profundidad.

Ello quiere decir, que comparando un tratamiento silvicultural con otro, hay 270 mm más que se pueden almacenar y luego evaporar, en el terreno forestado que en el terreno no forestado. Podemos suponer que en esa zona de almacenamiento disponible en el suelo, en un período lluvioso de 9 meses de duración, se llene y se vacíe total o parcialmente una o más veces. El volumen infiltrado no escurrirá si no se hubiera deforestado. El estudio que sustituiría la suposición, debería contar con los registros horarios de 9 meses de período lluvioso y del comportamiento de la zona de humedad en toda el área, por medio de sondas neutrónicas o con el procedimiento de análisis puntuales en estaciones representativas.

2.4.3. El razonamiento que sigue lo he justificado más arriba. Aunque no conozcamos la lluvia, sabemos que es tropical con una serie de chubascos intensos interrumpidos. Si aceptamos que el volumen escurrido correspondiente a la zona con bosques antes de deforestar es:

$$V_1 = C_1 \cdot S.P \text{ con bosques;}$$

$$V_2 = C_2 \cdot S.P \text{ sin bosques;}$$

$V_2 - V_1 = (C_2 - C_1) \cdot S.P = \Delta V$. Sería el incremento debido a la deforestación. Si sólo parte de la cuenca está deforestada (40 %) y 60 % permanece con bosques naturales, los cálculos serían así:

Volumen escurrido deforestando sólo una parte:

$$C_1 \cdot 0,60 S.P + C_2 \times 0,40 S.P. = 685 \text{ km}^3;$$

minar el nuevo coeficiente de escorrentía resultante al deforestar, siempre que correspondan al mismo suelo. Es también mi opinión, como dije antes, y la extensión de los resultados de los experimentos de Ming Chang es aplicable a la cuenca del río Iguazú y parte del río Paraná con un criterio conservador, pues el suelo de esa cuenca es mucho menos arenoso que el suelo del lugar de Texas donde Ming Chang efectuó el experimento.

En nuestro caso las consecuencias de la deforestación serían mayores que las correspondientes al experimento de Ming Chang. En cambio, en la parte norte de Río Grande Do Sul el terreno es más arenoso y allí serían aplicables los coeficientes encontrados por este investigador. De lo que no estamos seguros es cuál ha sido el tratamiento silvicultural adoptado al deforestar, por lo cual más abajo adoptamos prudentemente un número menor.

3. Cálculo tentativo en las cuencas del Iguazú y Paraná, de la influencia de la deforestación en la hidrología.

Este cálculo se encara siguiendo dos caminos: el primero estimando cuantas veces puede vaciarse y llenarse el perfil del suelo por la capacidad de recarga y el segundo aplicando la variación de los coeficientes de escorrentía.

3.1. *Cálculo basado en la mayor capacidad de infiltración y almacenamiento, en forma de humedad, en el terreno forestado que en el deforestado a lo largo del tiempo por mayor capacidad de recarga*

En 2.4.2. planteamos dos hipótesis de llenado anual de la diferencia de almacenamiento, mayor en el forestado que en el deforestado. En la cuenta del Paraná-Iguazú, considerando la primera hipótesis, se hubiera evaporado en exceso, en los 350.000 km² deforestados, 94,5 km³ y en la segunda hipótesis 189 km³. Ambos números son posibles, pues durante la tormenta hubo exceso de agua disponible, hubo calor y también hubo energía eólica que retirara continuamente la humedad de las hojas. Lo probable es pensar en 140 km³ que no hubieran escurrido, por la cual la crecida de 685 km³ en Posadas hubiera tenido un valor de 540 km³, lo que es un 21 % menos. La crecida hubiera sido un 80 % de la registrada.

3.2. *Cálculos basados en los resultados del cuadro 1 y en los coeficientes de escorrentía del cuadro 2*

Como está indicado en el cuadro 2, el coeficiente de escorrentía para la cuenca forestada es del 8 %, y para la cuenca cultivada el 40 %; además allí hay otros valores para otros tratamientos silviculturales.

Consideramos que la cuenca de 907.000 km² fue deforestada en un 40 %, sobre todo en la parte sur (ríos Iguazú e Ivai) y el 60 % quedó con bosque. Aplicamos la fórmula obtenida en el punto 2.4.3. y expresamos los resultados en el cuadro 6. Esta aplicación está hecha a título informativo para averiguar que resultaría de las fórmulas anteriores si toda la parte de la cuenca deforestada hubiera recibido un tratamiento silvicultural uniforme. Según Rutter (1968) de acuerdo con cálculos efectuados en una cuenca de gran extensión en Kenya, el coeficiente de escorrentía para el terreno forestado no perturbado es del 12 %.

Aplicamos la fórmula del punto 2.4.3. con los coeficientes para los distintos tratamientos silviculturales, que se indican en el cuadro 2. Por supuesto que los valores que se obtienen considerando toda la cuenca cultivada son excesivos ya que toda la cuenca deforestada no está cultivada sino clareada o con otros tratamientos silviculturales. En cambio los datos que aparecen como resultado de tratamientos de la cuenca de menor agresividad, son comparables a los que se obtuvieron por el primer camino, sobre todo considerando que este camino es sumamente conservador, pues la capacidad de almacenamiento del suelo, si se hubiera mantenido la selva en la parte deforestada, tendría una diferencia mucho mayor que 0,20 g/cm³ por el espesor del suelo, pues el deforestado puede que no mida 1,35 dado los lentes impermeables que se pueden formar y el forestado seguramente tiene más que 1,35 de suelo poroso. Rutter (1968) en Kenya habla de 4,50 m de profundidad de raíces en la selva.

Como número sujeto a todas las precauciones que indiqué anteriormente y que deberá ser objeto de cuidadosas investigaciones, podemos

CUADRO 6

Escorrentía % de lluvia neta	Estado del terreno	Chang. Tratamiento	Cuenca del Plata según los resultados de Chang Rutter *	
8	Forestado (no disturbado)	A	0	
10	Foresta clareada (50 % de densidad de corona)	B	76 Km ³	
10	Foresta cortada, con toda la madera comerciable removida y sin preparación del sitio	C	76 Km ³	
21	Foresta cortada hecha rollizos	D	260 Km ³	184 Km ³
31	Foresta cortada, trozada, las raíces, arrancadas y apilando los troncos en filas.	E	363 Km ³	287 Km ³
40	Foresta cortada, limpiado del terreno con arados en surcos continuos, cultivado hacia arriba y hacia abajo de las colinas	F	424 Km ³	328 Km ³

* Para Rutter coeficiente forestado 12 %.

adoptar 185 km³ como volumen de agua que no hubiera escurrido en la crecida si no se vinieran talando los bosques desde 1930.

Por supuesto que la posición contraria, que dice que el incremento es 0 km³, no es adoptable por todas las razones que se dijeron antes. Si los 185 km³ hubieran dejado de escurrir en forma uniforme durante 9 meses, la crecida hubiera sido de 7.930 m³/s menos en el máximo en Posadas que fue 46.610 m³/s, correspondiente a una lectura de escala de 7,09 y 38.600 m³/seg con altura de escala 6,09 m. Es decir que el agua hubiera subido 1 m menos de lo que lo hizo. No puedo en este resumen apretado hacer los análisis estadísticos basados en Motor Columbus (1979), pero la variación del universo estadístico nos indica que la cuenca se ha hecho más peligrosa, no porque las crecidas puedan ser mayores solamente, sino porque las correspondientes a una lluvia con un gran período de retorno pueden ser ahora producidas con lluvias menores con menor período de retorno.

4. Incremento del valor de pico de la crecida por influencia de los embalses brasileros.

En lo escrito anteriormente, siguiendo a Pfafstetter (1976), Klemes (1973) y Linsley (Fuschini Mejía, 1979), que trabajó para el proyecto de Itaipú en Brasil, se describe la consecuencia del efecto de la aceleración de la onda de crecida, cuya velocidad, al transcurrir por un embalse lleno, es mayor que la que hubiera sido al transcurrir por el tramo sin embalse.

La forma de la cuenca "redondeada" como dice Pfafstetter (1976), hace que las crecidas de los afluentes (Paranapanema, Tieté, Ivaí, etc.), producidas por una lluvia general, aceleradas por los embalses llenos, entren en coincidencia con las crecidas del tramo principal aceleradas por los embalses construidos y a construirse mantenidos llenos, dando como resultado un pico, que es la sumatoria de los picos parciales amortiguados y que es mayor que el pico que se hubiera producido, si los cauces no hubieran estado ocupados por embalses llenos. Linsley hizo un cálculo para la consultora de Itaipú (Fuschini Mejía, 1979), analizando qué caudal hubiera habido en Guayrá para la lluvia máxima posible que adoptó, obteniendo como resultado 53.800 m³/seg. El mismo autor realizó el cálculo con los embalses llenos en la configuración final, hizo la propagación o routing y obtuvo que para la misma lluvia la crecida en Guayrá hubiera sido 72.000 m³/seg, lo cual indica un incremento del pico de crecida del 25 % debido a la presencia de los embalses hasta Itaipú excluido.

En nuestro caso, como no están todos los embalses que analizó Linsley, tomamos como incremento actual el 15 % y el resultado es que en Posadas en lugar de 46.610 hubiera habido 7.300 m³/seg menos, o sea

que la crecida hubiera sido de 39.300 m³/seg y en lugar de 7,09, en la escala se hubieran leído 6,10. No sumo totalmente este efecto, que es consecuencia de la propagación en el cauce, con el efecto del incremento de los caudales por la deforestación, porque no son estrictamente coincidentes, aunque en alguna medida lo son. Es decir, como conclusión, que si no se hubiesen hecho los embalses ni se hubiera deforestado, la crecida de 1983 hubiera sido de 36.000 m³/seg y la cota en Posadas, máxima en julio de 1983, de 5,70; esto debe investigarse cuidadosamente, introduciendo sobre todo los datos meteorológicos.

5. Sistema de defensa a analizar ante el problema actual.

Con los números que hemos visto anteriormente tenemos una visión del peligro actual para la Argentina como país agua abajo. Evidentemente, no se puede pensar en la reconstitución de la selva natural y tampoco tendría eficacia la reforestación total con especies de crecimiento rápido como hemos visto antes. Pfafstetter (1976) recomienda que en esos casos la defensa debe hacerse con obras de embalses para corrección de crecidas, o sea mantenidas vacías o con obras de embalses para generación hidroeléctrica, pero superando la idea del "volumen útil" al que se refieren los hidroeléctricos e introduciendo la idea de "volumen vacío para almacenar crecidas", unido a un sistema de alerta de crecidas. El plan de operaciones resultante, disminuye los picos de crecida por un vaciado previo, aumentando por lo tanto los tiempos de base y hace la crecida menos depredatoria en lo que se refiere a altura de los picos.

Según Benito (OEA, 1983) los embalses brasileros construidos y a construirse en la cuenca del Paraná tienen 487 km³ que corresponden a 15.450 m³/seg. Según Motor Columbus (1978), el volumen actual es 350 km³ y faltan construir algunos, pero Motor Columbus opina que el "volumen útil" al estilo hidroeléctrico, es de 128 km³. Con estos números se ve que el problema tiene solución pues no es necesario almacenar los 685 km³ de crecida.

En el terreno argentino se computa Corpus, sobreelevado a cota 150, que brindaría 25 km³ de volumen disponible; por supuesto mi opinión es que si se sobreeleva Corpus debe estudiarse en Pindoí, pues todo el antiguo asentamiento jesuítico de Misiones con centro en San Ignacio no debe ser condenado a inundaciones totales eventuales. Motor Columbus (1979) habla de construir Corpus aguas abajo de Itacua, aún de Garupá y se obtienen 38 km³ a cota 150, configuración que merece mi objeción anterior. En el Iberá el ingeniero Stanley de Agua y Energía de Argentina propone dividirla en dos cuencos, uno de 500.000 hectáreas y otro de 700.000 ha manteniendo el superior lleno y el inferior con

una variación menor de 10 metros, que proveerá 135 km³ de volumen vacío para almacenar. Sin lugar a dudas el Iberá debe estudiarse incrementando las observaciones hidrológicas, edafológicas, meteorológicas, etc., en su interior y viendo si ese ecosistema puede soportar una inundación de 15 m cada 50 años. En mi opinión no corresponde tomar los 135 km³ como posibles, pero sí, con el proyecto Stanley o con otro, se pueden computar 85 km³ de almacenamiento. Considerando además los 25 de Corpus sobreelevado, más 18 km³ que pueden estar saliendo por los ríos Miriñay y Corrientes, resultan 130 km³ de capacidad de almacenamiento de crecidas.

Si admitimos en Corrientes 40.000 m³/seg durante 9 meses, daría 933 km³ o sea que no se usarían esos cuencos; pero admitiendo 30.000 m³/seg de caudal constante máximo en Corrientes, podrían pasar desde Yaciretá 700 km³. La crecida fue de 914 km³ y tendría que existir un volumen de 214 km³ para almacenar, que no existe, pues como vimos arriba es de sólo 130; faltan por lo tanto 84 km³. Como se sostiene que en Brasil se cuenta con 128 km³ útiles, en teoría podría haberse resuelto el problema de esta crecida, pero no así el de la crecida esperada de 95.000 m³/seg que seguramente será mayor. Sería un trabajo muy importante el de la instalación de sistemas de alerta, especialmente con medición de lluvia horaria y sistemas de operación de los embalses, para disminuir en 128 km³ el volumen de agua que entra a la Argentina en esos 9 meses y escurrirlo después, si fuera posible, según la geografía y la distribución de la lluvia. La mayor parte de las veces será posible. Aunque parezca muy pequeño el volumen de almacenaje obtenido con Corpus sobreelevado, puede utilizarse para almacenar las rápidas crecidas del Iguazú y vaciarlo enseguida. En cambio, la capacidad de amortiguamiento del Iberá debe usarse para las grandes crecidas del Paraná. En lo que respecta al tramo aguas abajo de Corrientes, Ceirano (1983) sostiene que se puede reducir apreciablemente el efecto de la crecida que entra por Corrientes, pre-vaciando el embalse de Paraná Medio por debajo de la cota correspondiente a su volumen útil.

Es decir, que a costa de una merma en la producción de la electricidad, se obtendría la defensa de Santa Fe aguas abajo. Sin lugar a dudas, Resistencia debe ser defendida por medio de un recinto, pero que no funcionaría tan solicitado como el de ahora y Clorinda y Formosa también deben ser defendidas por recintos. En cambio el sur de las Provincias del Chaco y Santa Fe, deben defenderse desde ahora por medio de un dique longitudinal que más adelante será la obra de margen derecha de Paraná Medio; por supuesto que todos los arroyos que desembocan al Paraná en esa zona deben ser tratados, según el proyecto de Agua y Energía existente, que los desagua, por medio del Saladillo, aguas abajo de la presa de Chapetón.

Agradezco a la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y

Naturales, la atención que me ha prestado. Expreso mi reconocimiento a Fioriti, M. J., Gaviño Novillo, J. M., Mancini, H. C. y Pozzolo, M. S., la colaboración que me han prestado.

Buenos Aires, abril de 1985

N. B.: actualización a diciembre de 1985.

BIBLIOGRAFIA

- BID (Banco Interamericano de Desarrollo), 1983. Progreso Económico y Social en América Latina.
- COMISSAO INTERSTADUAL DA BACIA URUGUAI-PARANÁ, 1966. Hidrología da Bacia do-Alto Paraná. Sao Paulo.
- CHAREAU, C., 1983. Soils of tropical dry and dry-wet climatic areas and their-use and management. Cornell University. IAHS Nº 140.
- DE NARDIN, E., and W. A. WUNSCH, 1979. Erosión y Conservación de Suelo en el Brasil con referencia especial a la región perteneciente a la Cuenca del Plata. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Tomo 23 Nº 12. Simposium La Erosión en la Cuenca del Plata. 28 y 29 de Noviembre de 1979.
- FRANZLE, O., 1980. The water balance of the tropical rain forest of Amazonia and the effects of human impacts. Instituto Geográfico de Kiel.
- FUSCHINI METÍA, M. C., 1979. Corpus-Itaipú Síntesis Armónica. O.I.K.O.S. Buenos Aires.
- HSIA, J. J. 1983. Water Yield resulting from clearcutting a small Hardwood basin in Central Taiwan. ITHS Nº 140.
- JENNY, H. 1941. Factors of soil formation. Mc Graw Hill Book Co. N. York.
- KLEMES, V., 1973. Application of Hydrology to Water resources management. O. M. M. Nº 356. Serie de Operational Hydrology report Nº 4.
- KOWAL, and KASSAM, 1976. Energy load and instantaneous intensity of rain storms at Samaru, Northern Nigeria, Tropical Agriculture (Trinidad).
- KUGLER, W. 1983. Inundaciones y Erosión del Suelo en la Cuenca del Plata. Inédito.
- LAL, R., 1981. Analysis of different processes governing soil erosion by water in the tropics. Erosion and sediment transport measurement. (Proceedings Florence Simposium, June 1981).
- LAL, R., 1983. Soil Erosion in the Humid Tropics with particular reference to Agricultural Land Development and Soil Management. International Institute by Tropical Agriculture. Ibadan. IAHS Nº 140.
- MAAK, R., 1968. Geografía Física do Estado do Paraná. Badep-UPF. Curitiba.
- MING CHIANG, J. C. TING, K. L. WONG, and W. V. HUNT, 1983. Soil Moisture Regimes as affected by silvicultural treatments in humid east Texas. IAHS Nº 140, pág. 175. School of Forestry, Stiffem F. Austin State University, Nacogdoches, Texas. Estados Unidos.
- MORAES, VICTOR, M. A., 1968. A devastacao Forestal. Sociedade Brasileira de Silvicultura.
- MOTOR COLUMBUS., 1979. Estudios de crecidas Río Paraná y Paraguay. VI: Resumen y Recomendaciones. Hidrología Básica. Buenos Aires-Asunción.
- NOCK, H. P., 1969. Plant Research and Development. The brasilian afforestation programme. Edited by the Institute for Scientific Cooperation in conjunction with the Federal Research Center for Forestry and Forest Product and numerous member of German Universities. Hamburgo.

- OEA (Organización de Estados Americanos). BENITO, H., 1983. Inventario Hidroenergético de la Cuenca del Plata. Departamento de Desarrollo Regional.
- OEA (Organización de Estados Americanos), 1969. Inventario y Análisis de la información básica sobre recursos naturales. Cuenca del Río de la Plata. Estudio para la Planificación y Desarrollo.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial), 1983. Operational Hydrology in the humid tropical regions. IAHS Publication N° 140.
- PFAPSTETTER, O., 1957. Chuvas Intensas no Brasil.
- PFAPSTEJTER, O., 1976. Defluvio Superficial. Ministerio del Interior. Departamento Nacional de Obras de Saneamiento, Brasil.
- RUTTER, A. J., 1968. Water Deficits and Plant Growth. Edited L. Kozlowski. Water Consumption by Forest.
- S.C.S. (Soil Conservation Service). National Engineering Handbook. Seccion 4. Hydrology. Part. 1. Watershead Planning. S.C.S. U.S. Department of Agriculture.
- SUSMEL, L., 1969-1970. La Bonífica.
- TROLL, C., 1965. Jahreszeitemklimat der Erde. World Maps of Climatology Spring Verlag. New York, Inc. 2nd. edition.
- UNESCO-IAHS., 1983. Hydrology of humid tropical regions. Hydrological effects of agriculture and forestry practice. Proceedings of Hamburg Syposium. Publication N° 140.
- UNESCO-Rostlac, 1982. Guía Meteorológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur.
- WILSON, M. F., and HENDERSON SELLERS, 1983. Deforestation Impact Assesment. The problem involved IAHS Publication N° 140.