ARTÍCULO ORIGINAL / ORIGINAL ARTICLE

Cambios de uso de la tierra y su impacto en el ciclo hidrológico en la Cuenca del río Nacunday (Bosque Atlántico del Alto Paraná)

Land use changes and its impact on the hydrological cycle in the Nacunday River Basin (Upper Paraná Atlantic Forest)

Andrés Wehrle Martínez¹

¹ Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería. San Lorenzo, Paraguay. Autor de correspondencia: andreswema@gmail.com

> DOI: https://doi.org/10.32480/rscp.2018-23-1.107-122 Recibido: 19/02/2018. Aceptado: 26/03/2018.

Resumen: El objetivo principal fue estudiar las respuestas en bajas frecuencias que podrían generarse de la relación entre la precipitación, evapotranspiración y escorrentía, como consecuencia de los cambios en el uso del suelo de la cuenca del río Ñacunday. Para realizar el análisis del efecto de estos cambios en el uso del suelo en el balance hídrico, se aplicó el método de Análisis Espectral Singular a las series históricas de Precipitaciones (P), caudales (Q) y Evapotranspiración (ET). Se utilizaron sensores remotos para determinar la pérdida del Bosque Atlántico del alto Paraná en la cuenca donde se encontró que las mayores pérdidas de cobertura boscosa se dieron en la década del 80 con una disminución del 46.6% de los bosques y en la década del 90 la perdida fue de 24.8%.

Coincidentemente en el periodo 1980-2000, se registraron aumentos de Q de hasta un 50%, siendo que la P fue causal de solo un 20% de los aumentos de Q. La ET determinada a partir del balance hídrico también reflejó la deforestación.

Palabras clave: río Ñacunday, Balance Hídrico, cambio de usos de suelo.

Abstract: The goal of this investigation is to study the responses at low frequencies that could be generated from the relationship between precipitation, evapotranspiration and runoff, as a consequence of changes in land use in the Nacunday river basin. In order to analyze the effect of these changes on the water balance, the Singular Spectral Analysis method is applied to the historical series of precipitations (P), water flows (O) and evapotranspiration (ET)

Remote sensing is used to determine the loss of the Upper Paraná Atlantic Forest in the basin where it was found that the greatest losses of forest cover occurred in the 80s with a 46.6% decrease and in the decade of the 90 the loss was 24.8%

Coincidentally in the 1980-2000 period, Q increases of up to 50% were recorded, with P being responsible for only 20% of the Q increases. The ET determined from the water balance also reflected deforestation.

Key words: Nacunday River, Water Balance, change of land uses.



1.- INTRODUCCIÓN

El cambio en los usos del suelo modifica el balance hídrico, por lo que está muy relacionado con la respuesta de los sistemas fluviales. La deforestación de los bosques, considerada el cambio de uso de suelo más agresivo, aumenta los riesgos de inundaciones e incrementa la gravedad de los daños producidos sobre el territorio y la población (1).

Analizando más de un centenar de cuencas con extensiones que cubrían un rango de 1 a 2.500 has. concluyeron lo siguiente: a) disminución de cobertura boscosa aumenta el caudal (Q) medio; b) por el contrario, el aumento de la cobertura boscosa en áreas con escasa vegetación disminuye el Q medio; c) si la deforestación es menor al 20% no es posible detectar influencia en los Q medios, d) el estudio de cuencas de a pares (mismas condiciones climáticas) genera mejores resultados, pues permite una comparación directa entre las mismas (2). Otro estudio confirmó estas conclusiones estudiando la hidrología de los bosques tropicales, además resalta la necesidad de investigar la respuesta hídrica a la conversión de bosques en cultivos anuales (3).

El Fondo Mundial Para la Naturaleza (WWF) ha identificado 200 Ecorregiones Globales prioritarias para su conservación. Éstas representan las regiones más destacadas del espectro global de los diversos hábitats terrestres y acuáticos del planeta (4, 5). En particular, el Bosque Atlántico (BA), conforma una de las ecorregiones mencionadas en estado crítico o en peligro de extinción. La porción sudoeste del BA constituye una subecorregión que ha sido denominada Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA) (6). En la (Figura 1) se observa la ubicación del BAAPA la cual se ubica dentro de la Cuenca Alta del Río Paraná (de aquí en adelante denominada CARP) (5, 6). El BAAPA juega un rol importante en la conservación del balance hídrico de las cuencas regionales, asegurando la cantidad y la calidad de agua.

La situación de la CARP, aguas arriba de la ciudad de Posadas, evidenciaba en el año 1988 que gran parte de la región estaba afectada por una intensa influencia antropogénica (7,8). Específicamente en el Paraguay el cambio en el uso del suelo se inicia con mayor intensidad a principios de los años 80. La construcción de la central hidroeléctrica de Itaipú sobre el río Paraná, que se inició en el año 1978 y finalizó en octubre de 1982, representó un impacto muy importante para la región, con la consecuente apertura de caminos y rutas hacia el este del Paraguay. Todos estos cambios provocaron la expansión de la agricultura mecanizada, especialmente de la soja, entre los años 1981 y 1999. Mediante imágenes LandSat, se reveló que, en el año 1973, en la región oriental del Paraguay, el área cubierta por el BAAPA representaba un 73,4% de la superficie original, reduciéndose rápidamente al 40,7% para 1989, hasta alcanzar el 24,9% en el año 1999 (9).



Figura 1: Ecorregión BAAPA y CARP (6).

En relación a las variables hidrológicas, se investigaron las principales actividades antropogénicas (agricultura, hidroeléctricas, navegación, etc.) que tienen impactos ambientales en la cuenca del Plata. Ellos encontraron un aumento en los Q a partir de 1970 que podría deberse al incremento de las precipitaciones (P) o al cambio de uso del suelo. Los autores sugieren que, si los cambios en el uso de la tierra contribuyen a un incremento de la escorrentía, tal efecto debería ser semipermanente o al menos de largo período (10). Utilizando el método Análisis Espectral Singular (SSA) se estudió la respuesta de la CARP dividiéndola en 4 subcuencas en las cuales determinaron Q, P y coeficientes de escorrentía (C), medios anuales para los periodos 1931-1970 y 1971-2000. Luego de un análisis riguroso, los autores observaron un aumento de C en la subcuenca P3 (Sao Simao-Guaira) muy superior al aumento de las P. En contraste, para la subcuenca P4 (Guaira-Posadas), C decreció de un periodo al otro. Se atribuye el aumento de C en la subcuenca P3 a un posible efecto antrópico, especialmente al cambio en el uso del suelo (11).

Investigadores determinaron que los aumentos de Q en la cuenca del Plata durante las últimas cuatro décadas del siglo XX fueron generados por tres factores: a) una tendencia positiva en las P en la mayor parte de la cuenca, b) una tendencia negativa de la evaporación que tiene origen en el cambio de uso del suelo y c) en menor medida una contribución por cambios en otras variables climáticas. La contribución relativa de estos factores varía a lo largo de las cuencas, considerando los periodos 1960-1979 y 1980- 1999 (12).

Se determinó que las transformaciones de los bosques en cultivos en la subcuenca P4, se originaron y avanzaron intensamente a inicios de la década del '80, continuando hasta los años '90 encontrando que estos cambios produjeron grandes aumentos en los Q donde además la ET (determinada a partir del balance hídrico) reflejó los impactos de la deforestación. Hasta finales de los '70 la tendencia positiva de la ET se relaciona a la extensa cobertura del BAAPA asociada al aumento de P. Esta tendencia cambió drásticamente en el año 1979, cuando pasa a ser negativa hasta finales de los '90, a partir de donde se estabiliza hasta el año 2009. Se concluyó que los aumentos de Q en la cuenca P4 se dieron después del año 1985, a diferencia de lo ocurrido en las cuencas del Brasil donde el aumento se registró en 1970 (13).

En general, en la cuenca del Plata se encontró que los Q en las principales subcuencas presentan un aumento en las últimas décadas. Estos aumentos pueden deberse al cambio de uso de suelo o a factores climáticos, entre ellos el aumento de P (7, 10, 12, 13, 14, 15). Teniendo en cuenta estos antecedentes este trabajo se basa en la hipótesis de que los cambios en el uso del suelo generan una respuesta de largo plazo (tendencia) en los caudales, el cual no se puede atribuir solamente a factores climáticos.

El objetivo principal es estudiar las respuestas en bajas frecuencias que podrían generarse de la relación entre la precipitación, evapotranspiración y escorrentía, como consecuencia de los cambios en el uso del suelo de la cuenca del río Ñacunday.

2.- METODOLOGÍA

El efecto de la deforestación en la respuesta hidrológica de una cuenca ha sido motivo de diversos estudios. En general, existen dos tipos de estudios: los que emplean modelos hidrológicos acoplados a otros modelos de cambio climático y los que utilizan análisis estadísticos. Entre el segundo grupo se encuentran los análisis realizados utilizando diferentes técnicas estadísticas, como ser el test de Mann–Kendall, t-test, SSA, entre otros. En la CARP, utilizando alguno de estos métodos, se destacan las investigaciones de varios autores (12, 14, 15, 16, 17).

Los métodos exploratorios con que se analizan las series temporales en climatología, tratan de separar las "señales armónicas" de la variabilidad de fondo o "ruido". Tal descomposición es realizada con la finalidad de identificar los procesos responsables de estas señales (18).La detección de señales en las series climáticas persigue cuatro objetivos primordiales: a) reconocer las formas o características de la variabilidad natural y distinguirlas de aquellas presumiblemente generadas por acciones antropogénicas u otros efectos externos b) inferir mecanismos físicos a partir de las señales detectadas para construir modelos numéricos, c) validar modelos numéricos comparando las características fundamentales de los datos generados con los observados y d) utilizar las señales en sí mismas, para pronosticar el comportamiento del sistema en el futuro.

En base a los resultados obtenido por (11) y (13) en esta investigación se propone continuar el análisis con el método SSA y la metodología utilizada por (12), en la cuenca del río Ñacunday ubicada en la subcuenca P4. Se considera una escala de datos anuales de las variables del balance hídrico y se pone énfasis en el análisis de las señales en bajas frecuencias.

Los datos de Q y P se obtienen de forma directa y para obtener la ET se utiliza la ecuación de balance hídrico simplificado que para una escala anual se puede escribir como ET \approx P – Q (19).

Finalmente se analizan en forma conjunta los resultados del estudio de las series de datos de los variables del balance hídrico con los resultados de los cambios de uso de suelo determinados a partir de sensores remotos, con el fin de determinar la respuesta en los caudales producidos por el cambio de uso de suelo.

1.1. Análisis Espectral Singular (SSA)

El método SSA es un método estadístico relacionado al Análisis por Componentes Principales (ACP), pero a diferencia de este último que se aplica fundamentalmente en el espacio, el SSA se aplica en el dominio temporal. Mediante el SSA se logra la descomposición de una serie discreta y finita, en componentes aditivos que son series independientes e identificables (20, 21, 22, 23). Cabe mencionar que el SSA se ha convertido en un método estándar en la investigación del clima (11, 24, 25, 26).

El objetivo principal de esta técnica es extraer información de la dinámica de una serie de tiempo mediante su descomposición en una suma de componentes interpretables; por ejemplo, tendencia, estacionalidad, componentes oscilatorios y ruido. En la práctica el SSA convierte una serie temporal de datos de dimensión N en otra de dimensiones M. El proceso consiste en obtener la matriz de covarianzas desplazadas C_X de dimensiones M_XM de la serie X(t) para luego diagonalizarla y obtener información espectral suponiendo que es débilmente estacionaria. La matriz C_X puede ser estimada directamente a partir de los datos como una matriz de Toeplitz con diagonal constante, es decir que los elementos c_{ij} dependen solamente del desplazamiento |i-j| (20).

Los M autovectores (E_k) de la matriz CX son llamadas funciones empíricas ortogonales temporales (EOFs, por sus siglas en inglés). Los autovalores \Box_k de la matriz CX cuantifican la varianza parcial en la dirección de E_k y la suma de los \Box_k cuantifica la varianza total de la serie original X(t).

La descomposición de la serie original, se logra proyectando la X(t) en cada EOF para obtener las componentes principales (PCs) temporales, (A_k) . Los modos oscilatorios se caracterizan por pares de λ_k similares o iguales y las A_k asociadas a ellos están aproximadamente en cuadratura (27). Tales pares pueden representar eficientemente a una oscilación armónica o no lineal. Cabe destacar que un par de autovectores del SSA, adaptados de los datos originales, capturan mejor la periodicidad básica de un modo oscilatorio que otros métodos clásicos como las transformadas de Fourier, que usan funciones básicas fijas como senos o cosenos (27).

La serie X(t) se puede reconstruir en su totalidad o parte de ella usando una combinación lineal de las A_k y EOFs. (27).

1.2. Análisis regresivo

Se utiliza un análisis regresivo para determinar los factores independientes y dependientes de la P atribuibles al crecimiento de Q. El método ha sido aplicado con buenos resultados, por lo se adoptó por una aplicación similar. La metodología adoptada consiste en una aproximación de la relación entre la P y los Q expresada en la Ec. 1. (12).

$$F_i = f(P_i) + O_i$$
 Ec. 1

donde F representa la contribución de caudales de la cuenca para cada año i, $f(P_i)$ representa los procesos en función de la precipitación y O_i los procesos independientes de la precipitación. Esta ecuación se ajusta a una relación lineal de la forma:

$$Q_i = a \times P_i + b + e_i$$
 Ec. 2

donde "a" es la pendiente de la regresión lineal que describe la fracción de los cambios en las P que generan cambios en los Q. La intercepción de la línea con el eje está representada por b y e_i corresponde a todos los procesos que contribuyen al Q y son independientes de la P. La e_i se determina para cada año a partir del valor de Q observado y del valor de Q calculado a partir de la ecuación que relaciona Q en función de la P (a x P_i + b). Los valores de e_i involucran no solo los procesos no asociables a la P sino que también involucra errores en los datos de P y Q. Por esto, para el análisis de los resultados obtenidos, se supondrá que los errores de ambas variables son sistemáticos y afectan a todas las mediciones por igual.

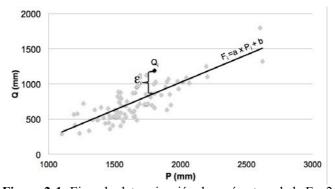


Figura 2-1: Ejemplo determinación de parámetros de la Ec. 2.

Se determinan dos periodos de trabajo, 1 y 2, para detectar el cambio de los Q entre ellos. Así, con la Ec. 2 se calculan la media para ambos periodos, con lo que se tiene el cambio de caudales (Q_2-Q_1) . La contribución dependiente de la precipitación a (P_2-P_1) y la independiente de la precipitación (e_2-e_1) , según la Ec. 3.

$$Q_2$$
- Q_1 = a x $(P_2 - P_1) + e_2 - e_1$ Ec. 3

1.3. Área de estudio y datos disponibles

El bosque original de la ecorregión del BAAPA cubría el área más grande de todas las ecorregiones del Complejo de ecorregiones del BA, unos 471.204 km², extendiéndose desde las laderas occidentales de la Serra do Mar en Brasil hasta el este de Paraguay y la provincia de Misiones en Argentina.

La cuenca del río Ñacunday se encuentra dentro del BAAPA y dentro de la subcuenca P4 por lo que se analizará en la misma la relación entre los componentes del balance hídrico y los cambios en el uso de suelo ocurridos en la misma. El área de la cuenca es de 2500 km² con una longitud del cauce principal de 150 km. En la (Figura 2) se observa la ubicación de la cuenca del río Ñacunday dentro del BAAPA y la CARP.

1.3.1. Datos hidrometeorológicos

Los datos de Q de la cuenca del río Ñacunday se obtienen del Proyecto "Inventario de los recursos hidroenergéticos de las cuencas hidrográficas de los ríos afluentes del Paraná y Paraguay en la Región Oriental del Paraguay".

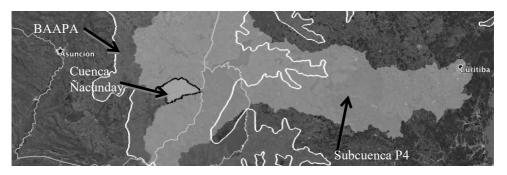


Figura 2 Ubicación de la cuenca del río Nacunday, subcuenca P4 y BAAPA (borde blanco)

En lo que se refiere a datos de P se cuenta con información a escala mensual, con una resolución de 0,5° x 0,5°, proveniente de la base de datos del Climatic Research Unit (CRU), disponible en www.cru.uea.ac.uk. Dicha base está conformada con datos mensuales de ocho variables climáticas desde el año 1901 hasta el año 2009, además de la precipitación mensual acumulada.

La Universidad de East Anglia en Inglaterra, genera series de datos globales en base a

datos de estaciones meteorológicas que el CRU ha ido compilando y actualizando. Primeramente, se construyó una grilla climatológica de resolución 0,5°x 0,5° con las medias mensuales de diferentes variables climáticas para el periodo 1901-1996, posteriormente en el año 2000 completaron las series temporales mensuales de esas variables climáticas hasta el año 2000, utilizando la misma grilla (30). Para la determinación de esta base de datos se utiliza el método de las anomalías, que trata de maximizar la información disponible de las estaciones meteorológicas en el tiempo y en el espacio. Estas bases de datos fueron actualizadas para nuevos periodos por diferentes autores, la versión utilizada es la CRU TS 3.1 (30, 31). La misma puede accederse desde http://www.cgiar-csi.org/data/uea-cru-ts-v3-10-01-historic-climate-database.

Varios autores utilizaron la base de datos CRU en diferentes trabajos, tanto de la cuenca del Plata como en otras cuencas de Sudamérica (11, 15, 32, 33).

1.3.2. Datos remotamente sensados

La utilización de imágenes satelitales para establecer cambios en el uso de suelo, data de principios de la década del '70 a partir de las primeras imágenes satelitales. Desde ese entonces se desarrollaron diversas técnicas y metodologías que han sido descritas por numerosos autores (35, 36).

En los análisis de cambio de uso de suelo de bosques a pasturas y/o cultivos, se pretende responder dos preguntas, dónde ocurren los cambios y cuándo acontecen los mismos. La respuesta a ambas preguntas implica un análisis espacial de la cobertura vegetal y un análisis de la dinámica temporal. La teledetección hoy en día permite obtener información de pequeñas y grandes áreas con diferentes grados de detalle y escalas espaciales, que permiten responder las preguntas formuladas.

El Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es el más utilizado para monitorear la vegetación. La fórmula del NDVI es:

∧ Ec. 4

Este índice ha sido utilizado en varios estudios de la dinámica vegetal en diferentes condiciones ambientales por involucrar información electromagnética correspondiente al rojo e infrarrojo cercano, que está disponible en casi todas las misiones satelitales (36, 37, 38).

1.3.3. Datos de los satélites LandSat

El archivo de datos LandSat del USGS cuenta con más de 40 años de registros de la superficie de la tierra. Las primeras imágenes disponibles datan de 1972 cuando se comenzó a tener datos de los primeros sensores satelitales. Los datos se pueden obtener en forma gratuita a través del sistema Global Visualization Viewer (GloVis) vía web. El listado con las imágenes utilizadas se encuentra en la Tabla 1.

Tabla 1: Denominación de las imágenes Landsat, identificación geográfica propia de Landsat expresada en Path and Row y fecha de adquisición de la imagen.

Nombre de la imagen	Path	Row	Fecha
LM2240078-1975-143	240	78	05-may-75
LM32400781980018	240	78	18-ene-80
LM4224078-1983-301	240	78	28-oct-83
LM5224078-1986-317	240	78	13-nov-86

Las imágenes contienen la energía electromagnética registrada por el sensor con números enteros, denominados niveles digitales (DN), estos pueden convertirse a valores de reflectancia en el techo de la atmósfera a través de parámetros y fórmulas provistas por LandSat. Este proceso es necesario para obtener la energía reflejada por la biomasa y así poder determinar los cambios de la superfície terrestre.

Para convertir los ND a valores de reflectividad ($\rho\lambda$), se asume una superficie uniforme y libre de nubes, y se aplican las ecuaciones Ec. 5 y Ec. 6.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{E_{\lambda 0} d^{-2} \cos \theta_{z}}$$
 Ec. 1

$$L_{\lambda} = G_{\lambda} (ND - ND_{min}) + B_{\lambda}$$
 Ec. 2

donde π (sr) representa la hipótesis de superficie Lambertiana, d es la distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas (UA), $E_{\lambda\theta}$ es la irradiancia solar espectral exoatmosférica (W m⁻² µm⁻¹) y Θ_z es el ángulo cenital solar, el subíndice λ indica el número de la banda, G_{λ} y B_{λ} (W m⁻² sr⁻¹ µm⁻¹) son los coeficientes de transformación de ND a valores de radiancia (39).El ND_{min} se le resta a todos los ND de las bandas del visible e infrarrojo cercano, como método simple para corregir los efectos de absorción por los gases atmosféricos (40). Cabe destacar que existe una metodología de clasificación utilizando 4 bandas del sensor

MSS y otra banda conteniendo los datos de NDVI y además otra clasificación además de estas 5 bandas otra conteniendo datos de un modelo digital de elevación del terreno (DEM) como banda adicional. Los autores mencionan que la consideración del NDVI y el DEM mejora la precisión de los resultados pero no pueden cuantificar esa mejora [35].

2.3.3 Información y productos utilizados, obtenidos a partir de sensores remotos. La iniciativa del grupo Global Land Cover Facility (GLCF) cuenta con información sobre la deforestación de áreas de bosques en el Paraguay. Como se mencionara en la introducción, utilizando imágenes LandSat se mapeo la cobertura del BAAPA entre los años 1990-2000 y estimó la extensión del mismo en el año 1973 (9). Esta información está disponible a

través del sitio http://glcf.umd.edu/data/paraguay/. El sitio ofrece un mapa del cambio de la cobertura boscosa en todo el Paraguay entre el año 1990 y el año 2000. En este proyecto el producto final es un mapa, con pixeles de 28,5 metros de resolución, de todo el Paraguay con 6 tipos de coberturas: Bosque Atlántico (Año 2000), Bosque Chaqueño (Año 2000), No Bosque, Agua, Pérdida de Bosque Atlántico (periodo 1990-2000) y Perdida de Bosque Chaqueño (periodo 1990-2000).

1.4. Determinación de cambios de uso de suelo en la cuenca del río Ñacunday

Para determinar los cambios de uso de suelo, se realiza un análisis mediante imágenes LandSat (sensores MSS) de final de la década del 70 e inicios de la del 80, estas imágenes con resolución espacial (30 m.) es la sugerida para este tipo de estudios (41).

Para el análisis de los usos de suelo en el año 1990 y 2000 se utilizan los productos de GLCF 2006, extrayendo los porcentajes de cobertura boscosa en el área de interés en cada año. Se tiene como producto las áreas de bosque y no bosque en la cuenca ya que no es de interés en este trabajo la clasificación del tipo de vegetación que cubre las áreas desforestadas.

Para determinar el cambio de uso de suelo en los demás años, la metodología utilizada consiste en realizar una clasificación con el método ISODATA con 5 bandas (4 bandas del sensor MSS y 1 banda del NDVI), como se explicó anteriormente (35). Para determinar el NDVI en el caso de las imágenes del sensor MSS se utilizan las bandas B2 (Rojo, 0.606–0.705) y B4 (Infrarrojo cercano, 0.812–0.979). Para calcular la reflectividad se utiliza las ecuaciones Ec. 5 y Ec. 6 posteriormente se determina el NDVI con la Ec. 1.

Resumiendo, se determina en detalle el cambio de uso de suelo en la cuenca del río Ñacunday con la metodología de [35] para imágenes de los años 1975,1980,1983 y 1986 y para los años 1990 y 2000 se utiliza los datos de GLCF. Así se obtienen los cambios de uso de suelo en la cuenca del río Ñacunday. En la (Figura 3) se observa que en el año 1975 se tenía una cobertura del 95% de bosque, y a partir de dicho año empieza a registrarse una disminución del mismo llegando a una cobertura de 67,8% para el año 1983, disminuyendo nuevamente hasta 37,6% para el año 1990 y quedando solo 12,8% para el año 2000. Los mapas con la cobertura del BAAPA se presentan en la (Figura. 4).



Figura 3: Variación de la cobertura boscosa cuenca de Nacunday periodo 1975-2000.

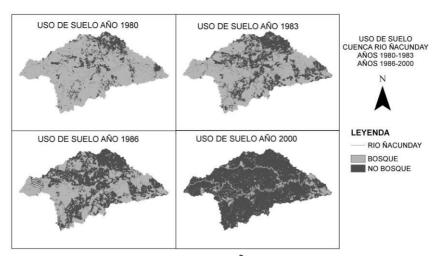


Figura 4: Mapas de uso de suelo de la cuenca Ñacunday años 1980-1983-1986-2000.

1.5. Análisis hidrológico de la subcuenca P4

Luego se procede a realizar el estudio de las variables hidrológicas para determinar su relación con los cambios de uso de suelo encontrados. En el análisis de las P se tiene que la componente de baja frecuencia en la cuenca del Ñacunday explica una varianza de 4,5% similar a la encontrada por (13) en la subcuenca P4 de 5,8%. Las diferencias se observan al final de la serie donde la serie de la cuenca del río Ñacunday presenta valores menores. Además se observa que a partir de 1965 las 2 series presentan valores superior a la media y al final de la serie un decaimiento de la señal a partir de mediados de la década de 1990. Teniendo en cuenta el grafico se observa que las características de las series de precipitación en ambas cuencas son similares.

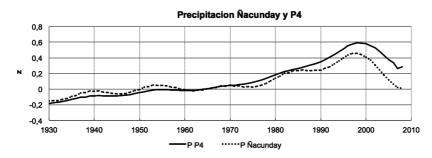


Figura 5: Reconstrucción de las componentes principales de P en la subcuenca P4, y Ñacunday.

Analizando la serie de Q se obtiene una componente de baja frecuencia, siendo la varianza explicada de 38%, la cual se muestra en la (Figura 6). Se observa una tendencia negativa que llega hasta el año 1963, a partir de ahí permanece la señal plana hasta el año 1978 donde inicia una tendencia positiva llegando hasta el año 1997, siendo los valores mayores a la media a partir de 1981. Al igual que lo observado en la subcuenca P4 en la componente de baja frecuencia de Q, la señal decae hasta el final de la serie (13).

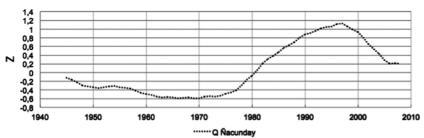


Figura 6: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de Q cuenca del río Ñacunday.

Finalmente se analiza en la cuenca del río Ñacunday la relación entre el cambio de uso de suelo y el balance hídrico. En el año 1975 la cobertura era de 95% perdiéndose en 15 años, hasta 1990, 58% del BAAPA en la cuenca del río Ñacunday. Esto ocasiona una disminución de la ET de 297 mm anuales, la cual con el aumento de las P en unos 136 mm anuales, en la cuenca, resulta en un aumento de 437 mm anuales en los Q del río Ñacunday (Figura 7). El pequeño aumento de la ET a partir de la década del 90 se puede deber al aumento de la temperatura encontrado en P4 BAAPA, lo que produce mayor ET. Otro factor puede ser el cambio en la cultura de cultivo, que propicia dicho aumento, como ser la siembra directa y la utilización de curvas de nivel.

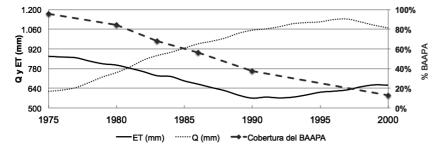


Figura 7: Q y ET en mm (medias anuales), y cobertura del BAAPA en %, para la cuenca del río Ñacunday.

Utilizando la metodología del análisis regresivo se determina el porcentaje atribuible a la P y a los otros factores que contribuyeron al crecimiento de los Q en la cuenca. Utilizando como año de corte entre periodos 1981, año en el cual los caudales son superiores a la media de todo el periodo en el análisis de la línea de tendencia. Así tenemos partir de la ecuación de regresión y los valores de P y Q, los términos de la ecuación cuyos valores se presentan en la Tabla 2.

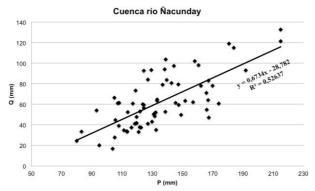


Figura 8: Relación entre Q y P (medias mensuales) de cada año y su ajuste lineal para (a) Cuenca río Iguazú (b) Subcuenca P4 Oeste y (c) Cuenca río Ñacunday

Tabla 2: Medias de las variables para el periodo antes y después del año de corte, de la por los todos los valores están en mm (expresados en medias mensuales)

	Año de corte	Q_1	Q_2	P_1	P_2		
Cuenca río							
Ñacunday	1981	47,8	84,4	130,7	141,8	-11,3	17,6

Se tiene que en la cuenca del río Ñacunday la P es responsable solo del 20% de los aumentos en los Q entre los periodos antes y después de 1981. Teniendo en cuenta ambos periodos determinamos para los mismos los coeficientes de escorrentía que representan la relación entre el agua escurrida con la precipitada obteniéndose un $c_1 = 0.36$ (1940-1981) y de c_2 =0.6 (1981-2009) es decir que se tuvo un aumento de casi el doble en la escorrentía de la cuenca.

4.- CONCLUSIONES

El análisis detallado de la evolución de la cobertura del BAAPA en la cuenca del Ñacunday, en el periodo 1980-2000, reveló que las mayores pérdidas de cobertura boscosa se dieron en la década del 80 con una disminución del 46,6% de los bosques. El uso de

información de sensores remotos permitió determinar áreas con tasa de deforestación mayor al 20%. Cabe recordar que dicho porcentaje es el umbral a partir del cual la cuenca modifica su comportamiento hidrológico. En función de este análisis, se delinearon los periodos críticos para determinar el impacto del cambio de uso de suelo en los Q y el balance hídrico.

Coincidentemente en el periodo 1980-2000, se registraron aumentos de Q de hasta un 50%, siendo que la P fue causal de solo un 20% de los aumentos de Q. La ET determinada a partir del balance hídrico también reflejó la deforestación. En efecto, la ET presenta tendencia negativa en la década del 80 (46% de la cobertura).

Al igual que en (13) los aumentos importantes de caudales en la cuenca del río Ñacunday se dieron recién en la década del 80.

Por otra parte, el análisis de las series históricas de las variables P y Q, utilizando el método SSA, permitió lograr el objetivo; es decir caracterizar la componente de baja frecuencia, que generalmente está asociada a los cambios sostenidos en el tiempo. En este estudio se determinó que todas las variables presentan tendencias positivas.

La deforestación acentuó el proceso de transformación P-Q, ya que aumentó la capacidad de escurrimiento y disminuyó el tiempo de respuesta. Asociado a la deforestación, las cuencas sin cobertura boscosa están más expuestas a la erosión de los suelos lo que sumado a pendientes pronunciadas agrava la situación. Estos procesos deben ser analizados en el futuro considerando la pérdida de los bosques y el aumento de Q encontrado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1. Bradshaw CJA, Sodhi NS, Peh KSH, Brook BW. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. Global Change Biology. 2007;13(11):2379-2395.
- 2. Bosch JM, Hewlett JD. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology. 1982;55:2-23.
- Bruijnzeel LA. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state of knowledge review. Ginebra, Holanda: IHP-IAHS-UNESCO; 1990.
- 4. Olson DM, Dinerstein E. The Global 200: A Representation Approach to Conserving the Earth's Distinctive Ecoregions. Conservation Science Program. World Wildlife Fund. US; 1998.
- Olson DM, Dinerstein E, Wikramanayake ED, Burgess ND Powell GVN, Underwood EC, D'Amico JA. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. BioScience. 2001;51(11):933-938.
- Di Bitetti MS, Placci G, Dietz LA. Una visión de biodiversidad para la ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná. Washington, D.C. World Wildlife Fund; 2003.
- Braga B, Tucci CEM, Souza Filho FA, Marengo JA, Molion LB, Clarke RT. Clima e recursos hídricos no Brasil. Porto Alegre: ABRH; 2003.
- 8. Leite C.C., Costa M.H., Soare-Filho B.S., Hissa L.B.V. Historical land use change and associated carbon emissions in Brasil from 1940 to 1995. Global Biogeochemical Cycle. 2012;26:13-21.
- 9. Huang C, Kim S, Altstatt A, Townshend JRG, Davis P, Song K, Tucker CJ, Rodas O, Yanosky A, Clay R, Musinsky J. Rapid loss of Paraguay's Atlantic forest and the status of protected areas -

- A Landsat assessment. Remote Sensing of Environment. 2012;106:460-466.
- 10. Tucci CEM, Clarke RT. Environmental issues in the la Plata Basin. Water Resources Development. 1998;14:157-173.
- 11. Krepper CM, Venturini V. Assessing interannual water balance of La Plata river basin. Atmósfera. 2009;22(4):387-398.
- 12. Doyle ME, Barros VR. Attribution of the river flow growth in the Plata basin. International Journal of Climatology. 2011;31(15):2234-2248.
- 13. Wehrle A, Venturini V, Jobbagy E. Cambios de uso de la tierra y su impacto en el ciclo hidrológico en la Región Bosque Atlántico del Alto Paraná (Cuenca del Plata). Santa Fe; 2016.
- 14. García N, Mechoso CR. Variability in the discharge of South American rivers and in climate. Hydrological Sciences Journal. 2005;50(3):458-478.
- 15. Krepper CM, García NO, Jones PD. Low-frequency response of the upper Paraná basin. International Journal of Climatology. 2008;28(3):351-360.
- Collischonn W, Tucci C, Clarke RT. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? Journal of Hydrology. 2001;245(1):218-238.
- 17. Antico A, Schlotthauer G, Torres ME. Análisis de la variabilidad hidro-climática de la cuenca del Paraná mediante un nuevo método de descomposición modal empírica. Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe, Argentina; 2014.
- 18. Allen MR, Smith LA, Monte Carlo SSA. Detecting irregular oscillations in the presence of coloured noise. J. Clim. 1996;9:3373–3404.
- 19. Brutsaert W. Hydrology. An Introduction. New York: Cambridge University Press; 2005.
- 20. Vautard R, Ghill M. Singular spectrum analysis in non-linear dynamics with applications to paleoclimatic time series. Physica D. 1989;35:395-424.
- 21. Ghill M, Vautard R. Interdecadal oscillation and the warming trend in global temperature time series. Nature. 1991;359:324–327.
- 22. Vautard R. Patterns in time: SSA and MSSA. In: von Storch H, Navarra A, editors. Analysis of climate variability: applications of statistical techniques. Berlin: Springer Verlag; 1995, p. 23-38.
- Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky A. Analysis of time series structure: SSA and related techniques. Monographs on Statistical and Applied Probability 90. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2001.
- Paluš M, Novotná D. Quasi-Biennial Oscillations extracted from the monthly NAO index and temperature records are phase-synchronized. Nonlinear Processes in Geophysics. 2006;13:287-296.
- 25. Hernández-Martínez M, Hidalgo-Muñoz JM, Gámiz-Fortis SR, Castro-Díez Y, Esteban-Parra MJ. Temporal variability and potential predictability of the streamflow regimes in the North-Eastern Iberian Peninsula. River Res. Appl. 2014.
- 26. Hidalgo-Muñoz JM, Gámiz-Fortis S., Castro-Díez Y, Argüeso D, Esteban-Parra MJ. Long-range seasonal streamflow forecasting over the Iberian Peninsula using large-scale atmospheric and oceanic information, Water Resources Research. 2015;51(5):35-43.
- 27. Ghill M, Allen RM, Dettinger MD, Ide K, Kondrashov D, Mann ME, Robertson AW, Saunders A, Tian Y, Varadi F, Yiou P. Advanced spectral methods for climatic time series. Rev. Geophys. 2002;40(1):3.1-3.41.
- 28. ITAIPU. Atlas del Potencial Hidroenergético del Paraguay. Proyecto Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las Cuencas Hidrográficas de los Ríos Afluentes del Paraguay y del Paraná de la Región Oriental del Paraguay Convenio Nº 4500020686/2011. Asunción; 2013.

- 29. New M, Hulme M, Jones PD. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. Journal of Climate. 1999;12:829-856.
- 30. New M, Hulme M, Jones PD. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 2: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. Journal of Climate. 2000:13:2217-2238.
- 31. Mitchell TD, Jones PD. An improved method of construct-ing a database of monthly climate observations and associatedhigh-resolution grids. International Journal of Climatology. 2005;25:693-712.
- 32. Costa MH, Botta A, Cardille JA. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. Journal of Hydrology. 2003;283:206-217.
- 33. Lee SJ, Berbery EH. Land cover change effects on the climate of the La Plata basin. J. Hydrometeor. 2012;13:84-102.
- 34. Hansen M, DeFries R. Detecting long-term global forest change using continuous fields of tree-cover maps from 8-km Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data for the years 1982-99. Ecosystems. 2004; 7:695-716.
- 35. Zhang Y, Chen X, Su S, Wu J, Qi J. Making the Best Use of Landsat MSS Images for Land Use/Cover Change Analysis, Environmental Science and Information Application Technology. In International Conference on Environmental Science and Information Application Technology; 2009.
- 36. Barbosa HA, Huete AR, Baethgen WE. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. J. Arid Environ. 2006;67:288-307.
- 37. Baldi G, Nosetto ND, Aragón R, Aversa F, Paruelo JM; Jobbágy EJ. Long-term satellite NDVI datasets: Evaluating their capacity to detect functional ecosystem changes in South America. Sensors. 2008;8:5397-5425.
- 38. Breunig FM, Galvao LS, Formaggio A, Epiphanio JCN. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011;13(1):34-42.
- 39. Chander G, Markham B, Helder D. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment. 2009;113:893-903.
- 40. Brivio PA, Giardino C, Zilioli E. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Lndsat TM images. International Journal of Remote Sensing. 2001;22:487-502.