

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

# **Cambios de uso de la tierra y su impacto en el ciclo hidrológico en la Región Bosque Atlántico del Alto Paraná (Cuenca del Plata)**

Andrés Wehrle Martínez

**FICH**

FACULTAD DE INGENIERIA  
Y CIENCIAS HIDRICAS

**INTEC**

INSTITUTO DE DESARROLLO TECNOLOGICO  
PARA LA INDUSTRIA QUIMICA

Tesis de Doctorado **2016**



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química

**CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA Y SU IMPACTO EN EL  
CICLO HIDROLÓGICO EN LA REGIÓN BOSQUE  
ATLÁNTICO DEL ALTO PARANÁ (CUENCA DEL PLATA)**

**Andrés Wehrle Martínez**

Tesis remitida al Comité Académico del Doctorado  
como parte de los requisitos para la obtención  
del grado de  
DOCTOR EN INGENIERIA  
Mención Recursos Hídricos  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
**2016**

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje “El Pozo”,

S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química

## **CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA Y SU IMPACTO EN EL CICLO HIDROLÓGICO EN LA REGIÓN BOSQUE ATLÁNTICO DEL ALTO PARANÁ (CUENCA DEL PLATA)**

**Andrés Wehrle Martínez**

### **CENEHA**

Centro de Estudios Hidro-Ambientales  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

### **Director:**

Virginia Venturini      Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

### **Co-director:**

Esteban Jobbagy      Grupo de Estudios Ambientales, IMASL  
Universidad Nacional de San Luis

### **Jurado Evaluador:**

Leticia Rodríguez      Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

Erik Zimmermann      Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y  
Agrimensura  
Universidad Nacional de Rosario

Ramiro Saurral      Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Universidad de Buenos Aires

Luis Sebastián Vives      Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo  
Usunoff".  
Universidad Nacional del Centro de la provincia de  
Buenos Aires

**2016**




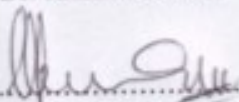
**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**

Santa Fe, 6 de Diciembre de 2016.

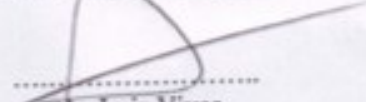
Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis, de Doctorado en Ingeniería titulada "*Cambios de uso de la tierra y su impacto en el ciclo hidrológico en la Cuenca del Plata: Estudio de la Región del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA)*", desarrollada por el Ing. Andrés Teodoro WEHRLE MARTÍNEZ en el marco de la Mención "Recursos Hídricos", certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

La aprobación final de esta disertación estará condicionada a la presentación de dos copias encuadradas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico del Doctorado en Ingeniería.

  
.....  
Dr. Ramiro Saurral

  
.....  
Dr. Erik Zimmermann

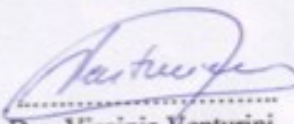
  
.....  
Dra. Leticia Rodríguez

  
.....  
Dr. Luis Vives

Santa Fe, 6 de Diciembre de 2016

Certifico haber leído la Tesis, preparada bajo mi dirección en el marco de la Mención "Recursos Hídricos" y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ingeniería.

.....  
Dr. Esteban Jobbagy  
Codirector de Tesis

  
.....  
Dra. Virginia Venturini  
Directora de Tesis

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar



## **DECLARACION DEL AUTOR**

Esta tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Doctor en Ingeniería - Mención Recursos Hídricos ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disposición de sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta tesis son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para la citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán concebidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

## **Agradecimientos**

En primer lugar a mis directores Dra. Virginia Venturni, Dr. Carlos Krepper y Dr. Esteban Jobbagy, por compartir conmigo sus experiencias y conocimientos; en especial a la Dra. Venturini por su apoyo y perseverancia en la etapa final de la tesis.

A los miembros del jurado, Dra. Leticia Rodríguez, Dr. Erik Zimmermann, Dr. Ramiro Saurral y Dr. Luis Sebastián Vives, por la lectura crítica del manuscrito de la tesis y sus valiosas recomendaciones.

A la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH-UNL) y en particular al Centro de Estudios Hidro-Ambientales (CENEHA), por brindarme el lugar para realizar esta tesis y en especial a los compañeros del CENEHA con los cuales compartimos horas de estudio, investigación, mates y asados, me hicieron sentir en familia. A los compañeros del Grupo de Estudios Ambientales de la UNSL con quienes dí los primeros pasos en la elaboración de la tesis, German muchas gracias por toda la enseñanza en la temática de sensores remotos.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción por el apoyo recibido en todo este proceso de formación doctoral, donde parte de mis horas de trabajo fueron dedicadas a esta investigación.

Al Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) el cual a través del proyecto CRN 2031 me otorgó una beca doctoral en los primeros 2 años y luego a la Entidad Binacional ITAIPU la cual me otorgó otra beca por 2 años nuevamente.

A los amigos que conocí en estos años de vida en Santa Fe, con los cuales compartí grandes momentos en esta ciudad, a mis amigos de La RocaX y Boulderland con quienes compartimos montañas y horas de escalada, con los que conocí el asado y la cerveza santafesina, infinitas gracias. A los amigos de Jamming con quienes compartimos grandes charlas, gracias Martin por recibirme en tu casa en la fase final de la tesis. A Guido, Cristian,

Caro, Euge, Seba, Jorge, Robert gracias por al aventuras que compartimos juntos y por estar siempre ahí en todo lo que necesitaba.

A la familia Gutiérrez Duran (Eduardo, Silvia, Alex, Jamishel y Nerón) por abrirme su casa y poder formar parte de su familia en los primeros años de estadía en Santa Fe, gracias por dejarme ser uno mas de la familia.

Por ultimo a mi familia, a mis padres que me enseñaron con el ejemplo que con perseverancia y trabajo se cumplen los sueños, a mis hermanos por apoyarme y ayudarnos entre todos a salir adelante, finalmente a Rocío por su paciencia, apoyo y amor incondicional y a Seba por enseñarme a ser papá y alegrarme todos los días.

## Resumen

El objetivo de esta tesis es determinar el impacto del cambio de uso del suelo en los componentes del ciclo hidrológico de la Cuenca Alta del Río Paraná (CARP), en la región del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA). El análisis de los índices de vegetación sugiere que gran parte de la CARP en Brasil no contaba con bosques en el año 1982. Por otro lado, se observa que las mayores pérdidas del BAAPA ocurrieron en Paraguay en el periodo 1980-2000. Para analizar el efecto de estos cambios en el balance hídrico, se aplica el método de Análisis Espectral Singular a las series históricas de precipitaciones (P), temperaturas del aire (T) y caudales (Q) de 2 subcuencas de la CARP. Las subcuencas seleccionadas, presentan patrones de deforestación diferentes y adecuados para analizar este proceso. En cada área de estudio, se procede sistemáticamente a determinar las componentes principales temporales de baja frecuencia las variables hidrológicas en diferentes escalas espaciales. En todos los casos analizados se encuentra que los Q presentan una componente de baja frecuencia y 2 componentes oscilatorias. Las bajas frecuencias de Q muestran aumentos estadísticamente significativos a partir del año en que la deforestación regional se intensifica. Es decir, que en las cuencas sobre Brasil los Q aumentan a partir de 1970, mientras que en las cuencas sobre el Paraguay este aumento se observa en 1980 aproximadamente. Las P presentan una tendencia positiva y componentes oscilatorios concurrentes con las de Q.

Finalmente se analizaron las variaciones del balance de las señales de baja frecuencia, en las cuencas de mayor envergadura. Así, se obtiene la serie de baja frecuencia de la evapotranspiración (ET), que refleja los diferentes procesos de cambio del uso del suelo ocurridos en la CARP durante el periodo 1950-2000.

## **Abstract**

The goal of this thesis is to determine the impact of the land use change on the water cycle components of the Upper Paraná River Basin (CARP), in the Upper Paraná Atlantic Forest (BAAPA). The analysis of vegetation indexes suggests that most of the CARP in Brazil had none forests in 1982. On the other hand, it is observed that the greatest losses of BAAPA occurred in Paraguay in the period 1980-2000. 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), air temperatures (T) and water flows (Q) of two sub-basins of the CARP. The selected sub-basins present different and suitable patterns of deforestation to analyze this process. In each study area, the study variables were systematically analyzed through time and at different spatial scales to find the principal component of them. In all the analyzed cases it was found that the Q series have a low frequency component and 2 oscillatory components. The Q low frequencies component show statistically significant increases from the year when regional deforestation intensifies. That is to say that in Brazilian basins Q increased from 1970, whereas on Paraguay basins Q increase is observed around 1980. P presents a trend and oscillatory components similar to those of Q.

Finally, the variations of the low frequency signals balance in the larger basins were analyzed. Thus, the low frequency evapotranspiration (ET) series is obtained, which reflects the different land use change processes that occurred in the CARP during the 1950-2000 period.

# Índice

Agradecimientos.....	i
Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Índice .....	v
Capítulo 1:    Introducción .....	1
1.1    Objetivos de la tesis .....	10
1.2    Estructura de la tesis .....	11
Capítulo 2:    Metodología .....	12
2.1    Test estadísticos .....	14
2.2    Análisis espectral singular (SSA) .....	15
2.3    Análisis regresivo.....	16
Capítulo 3:    Área de estudio y datos disponibles.....	18
3.1    Datos de caudales.....	22
3.2    Datos de precipitación y temperatura.....	25
3.3    Datos cartográficos .....	26
3.4    Datos remotamente sensados .....	27
3.4.1    Datos de los satélites LandSat.....	29
3.4.2    Información de evapotranspiración provista por los satélites Terra y Aqua.....	32
3.4.3    Información y productos utilizados, obtenidos a partir de sensores remotos.....	32
Capítulo 4:    Determinación de cambios de uso de suelo en la CARP y el BAAPA .....	35
4.1    Resultados de la determinación de cambios en el uso de suelo .....	37
4.1.1    Análisis de datos FASIR .....	37
4.1.2    Análisis de datos Landsat.....	41
4.1.3    Análisis de datos de evapotranspiración provisos por los satélites EOS- Terra y Aqua .....	47
4.2    Resumen de los usos de suelo en la CARP y el BAAPA .....	50
Capítulo 5:    Análisis hidrológico de la subcuenca P3 BAAPA.....	52
5.1    Precipitación en la subcuenca P3 BAAPA .....	53
5.2    Temperatura en la subcuenca P3 BAAPA .....	55
5.3    Caudales en la subcuenca P3 BAAPA.....	56
5.4    Balance hídrico en la subcuenca P3 BAAPA .....	57

5.5	Análisis de los Q y las P a diferentes escalas en la subcuenca P3 BAAPA.....	60
5.6	Resumen.....	62
Capítulo 6:	Análisis hidrológico de la subcuenca P4 .....	63
6.1	Precipitación en la subcuenca P4 .....	64
6.2	Temperatura en la subcuenca P4.....	65
6.3	Caudales en la subcuenca P4 .....	66
6.4	Balance hídrico en la subcuenca P4.....	67
6.5	Análisis de los Q y las P a diferentes escalas en la subcuenca P4 .....	69
6.6	Resumen.....	77
Capítulo 7:	Conclusiones.....	79
Bibliografía.....		82
Anexo 1	Análisis Espectral Singular (SSA).....	92
Anexo 2:	Datos de P y Q (anuales) utilizados en la tesis .....	101
Anexo 3	Comparación datos de precipitación CRU y estaciones meteorológicas.....	106
Anexo 4:	Gráficos datos medidos y reconstrucción señal de baja frecuencia de las Subcuencas P3 BAAPA y P4.....	109

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-2: Estaciones hidrométricas utilizadas en territorio brasilero. ....	23
Tabla 3-3: Estaciones hidrométricas en territorio paraguayo. ....	24
Tabla 3-4: Cantidad de celdas para cada cuenca y subcuenca de estudio dentro de la CARP. ....	26
Tabla 3-5: Especificaciones técnicas de los sensores Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM) y Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) a bordo de diferentes satélites LandSat. Fuente: Chander et al. (2009). ....	29
Tabla 3-6: Valores de Gain ( $G\lambda$ ), Biase ( $B\lambda$ ) e Irradiancia solar exoatmosférica media ( $E\lambda$ ) para todos los sensores MSS utilizados en esta tesis Fuente: Chander et al, (2009). ....	31
Tabla 3-7: Denominación de las imágenes Landsat, identificación geográfica propia de Landsat expresada en Path and Row y fecha de adquisición de la imagen. ....	31
Tabla 4-2: Parque y reservas naturales considerados para determinar la ET del BAAPA. ....	47
Tabla 5-1: Valores del Test de Mann-Kendall utilizando el Seasonal Mann-Kendall Test, para Q,P, y T de la subcuenca P3 BAAPA. ....	53
Tabla 5-2: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias con una significancia de 95%. ....	60
Tabla 5-3: Componentes de baja frecuencia obtenidos para los Q de las estaciones y P en la cuenca Paranapanema con su varianza explicada. ....	60
Tabla 6-1: Valores del Test de Mann-Kendall utilizando el Seasonal Mann-Kendall Test, para Q, P, y T de la subcuenca P4. ....	64
Tabla 6-2: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias con una significancia de 95%. ....	71



Tabla 6-4: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias de Q con una significancia de 95%. .....	77
Tabla 6-5: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias de P con una significancia de 95% en las subcuencas de P4. Los subíndices indican los periodos antes (1) y después (2) de 1985 .....	77

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1-1: Ecorregión Bosque Atlántico (Di Bitetti et al., 2003). .....	2
Fig. 1-2: Ecorregión BAAPA y CARP (Di Bitetti et al., 2003). .....	3
Fig. 1-3: Cobertura del BAAPA en 1970(a) y en 1995-2000 (b). Fuente: Di Bitetti et al. (2003). .....	5
Fig. 2-1: Ejemplo determinación de parámetros de la Ec. 2-4 .....	17
Fig. 3-1: Subcuencas de la CARP, BAAPA y estaciones hidrométricas que definen dichas cuencas, en colores cuencas de estudio definidas. ....	19
Fig. 3-2: Ubicación estaciones hidrométricas en la cuenca del río Paranapanema. ....	21
Fig. 3-3: Subcuenca P4 y cuencas de estudio dentro de la misma y cobertura del BAAPA. ....	22
Fig. 3-4: Ubicación de las estaciones hidrométricas utilizadas en la investigación dentro de la CARP. ....	24
Fig. 3-5: Ciclo anual de los Q medios mensuales en Posadas, Guaira y Porto Primavera, en m <sup>3</sup> /s. ....	25
Fig. 3-6: Cuencas de estudio dentro de la CARP y el BAAPA con la red de drenaje principal .....	27
Fig. 4-1: Tendencias de la media anual y el mínimo NDVI (FASIR) en la CARP (línea negra) para el periodo 1982-1999. En rojo las tendencias negativas y en azul las positivas. La línea verde corresponde a límites internacionales Fuente (Baldi et al., 2008). ....	35
Fig. 4-2: Ciclo anual medio de NDVI en la CARP para el periodo 1982-1999. ....	38
Fig. 4-3: Mapas de NDVI del mes de septiembre para (a) 1982 y (b) 1999 en la CARP. Gama de colores rojo representa no bosque, gama de colores verdes representa bosque y el azul agua. ....	39

Fig. 4-4: NDVI anual del Parque Iguazú (Argentina y Brasil).....	40
Fig. 4-5: Cuenca P4 Oeste, con límites del BAAPA (Di Bitetti et al.,2003) y de los países.....	40
Fig. 4-6: NDVI medio anual en diferentes áreas de la cuenca P4 Oeste. ....	41
Fig. 4-7: Uso de Suelo Subcuenca Residual P4 para el año 1980.....	42
Fig. 4-8: Porcentajes de usos de suelo en la Subcuenca P4 Oeste y en cada país para el año 1980. En cada columna el total corresponde al 100% de cada área.....	43
Fig. 4-9: Uso de suelo en la subcuenca P4 Oeste para el año 2000. ....	44
Fig. 4-11: Variación de la cobertura boscosa cuenca de Ñacunday periodo 1975-2000.....	46
Fig. 4-12: Mapas de uso de suelo de la cuenca Ñacunday años 1980-1983-1986-2000.....	46
Fig. 4-13: Mapa de las áreas con cobertura boscosa y sin cobertura boscosa año 2000. ....	48
Fig. 4-14: Ciclo anual de ET (mm), áreas con bosque y sin bosque en la Cuenca P4 Oeste. Período 2000-2010.....	49
Fig. 4-15: Ciclo anual de ET en cada país de la subcuenca P4 Oeste, del BAAPA y los cultivos. Período 2000-2010 .....	50
Fig. 5-1: Subcuenca P3 BAAPA y cuenca Paranapanema.....	52
Fig. 5-2: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de P en la subcuenca P3 BAAPA. Se observa en (a) la componente con periodo de 9 años (b) la componente de 3,5-4 años y en (c) la componente en baja frecuencia. ....	54
Fig. 5-3: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de T en la subcuenca P3 BAAPA. Se observa en (a) la componente con periodo de 3,5-4 años y 2 años; en (b) la componente en baja frecuencia.....	56
Fig. 5-4: Reconstrucción componentes principales de la serie de Q en la subcuenca P3 BAAPA. Se observa la componente con periodo de 9 años y la de baja frecuencia. ....	57
Fig. 5-5: Componentes principales de baja frecuencia de P, Q y $ET \approx P-Q$ de la cuenca P3 BAAPA, expresados en valores medios anuales. ....	58

Fig. 5-6: Relación entre Q y P (media mensual) de cada año y su ajuste lineal para la cuenca P3 BAAPA.....	59
Fig. 5-7: Componentes principales de baja frecuencia determinadas para los Q en las estaciones de la cuenca del río Paranapanema y la subcuenca P3 BAAPA. ....	61
Fig. 5-8: Componentes principales de baja frecuencia determinadas para las P en la subcuenca P3 BAAPA y la cuenca del río Paranapanema. ....	61
Fig. 6-1: Subcuenca P4 y cuencas de estudio dentro de la misma y cobertura del BAAPA.....	63
Fig. 6-2: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de P en la subcuenca P4. En en (a) la componente con oscilación de 9 años y 6-7 años, en (b) la componente de 3,5-4 años y en (c) la componente en baja frecuencia. ....	65
Fig. 6-3: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de T en la subcuenca P4.....	66
Fig. 6-4: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de Q en la subcuenca P4. Se observa en (a) la componente con periodo de 9 años y 3,5-4 años y en (b) la componente en baja frecuencia.....	67
Fig. 6-5: Componentes principales de baja frecuencia de P, Q y $ET \approx P-Q$ de la cuenca P4. ....	68
Fig. 6-7: Aporte de Q de la cuenca del río Iguazú en la subcuenca P4 y relación de la precipitación entre ambas áreas. En recuadro periodo de cambio del aporte de Q del Iguazú.....	70
Fig. 6-8: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de P en la subcuenca P4, Iguazú y Ñacunday.....	71
Fig. 6-9: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de Q en la subcuenca P4 e Iguazú. En recuadro periodo de cambio del aporte de Q del Iguazú.....	72

Fig. 6-10: Reconstrucción de la componente en baja frecuencia de Q en la P4 Oeste.....	73
Fig. 6-11: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de Q cuenca del río Ñacunday.....	73
Fig. 6-12 Q y ET en mm (medias mensuales), y cobertura del BAAPA en %, para la cuenca del río Ñacunday.....	74
Fig. 6-13: 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 .....	75

## **Capítulo 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 (Bradshaw et al., 2007).

Hewlett y Hibbert (1967) y más adelante Bosch y Hewlett (1982), analizando los resultados para más de un centenar de cuencas (cuyas extensiones cubrían un rango de 1 a 2.500 has.) concluyeron lo siguiente: a) la reducción de la cobertura boscosa aumenta el caudal (Q) medio; b) por el contrario, el establecimiento de una cobertura boscosa en áreas con escasa vegetación disminuye el Q medio; c) no es posible detectar influencia alguna en los Q medios, cuando la deforestación es menor al 20% y d) el estudio de cuencas experimentales de a pares, bajo las mismas condiciones climáticas, genera los mejores resultados, pues permite una comparación directa entre las mismas. Bruijnzeel (1990) estudió la hidrología de los bosques tropicales confirmando las conclusiones de Bosch y Hewlett (1982). Bruijnzeel (1990) resalta la necesidad de investigar la respuesta hídrica a la conversión de bosques en cultivos anuales.

Las investigaciones mencionadas se realizaron en cuencas experimentales, donde las condiciones ambientales pueden ser controladas. En contraste, el estudio de los efectos del cambio de uso de suelo en cuencas de gran escala se dificulta por la diversidad de usos de suelo presentes en la cuenca y la presencia de vegetación en diferentes etapas de crecimiento. Además, la distribución espacial y temporal de la precipitación en las grandes cuencas puede complicar el análisis (Bruijnzeel, 1990; Costa et al., 2003).

El Fondo Mundial Para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) 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

(Olson et al., 2000; 2001). En particular, el Bosque Atlántico (BA), conforma una de las ecorregiones mencionadas en estado crítico o en peligro de extinción. Originalmente el BA cubría la costa atlántica de Brasil, extendiéndose hacia el oeste por el Paraguay oriental y sobre el noreste de Argentina (Fig. 1-1). El BA está entre los bosques tropicales lluviosos más amenazados de la tierra, se calcula que subsiste solamente el 7% de su cobertura original (Olson et al., 2000; 2001).

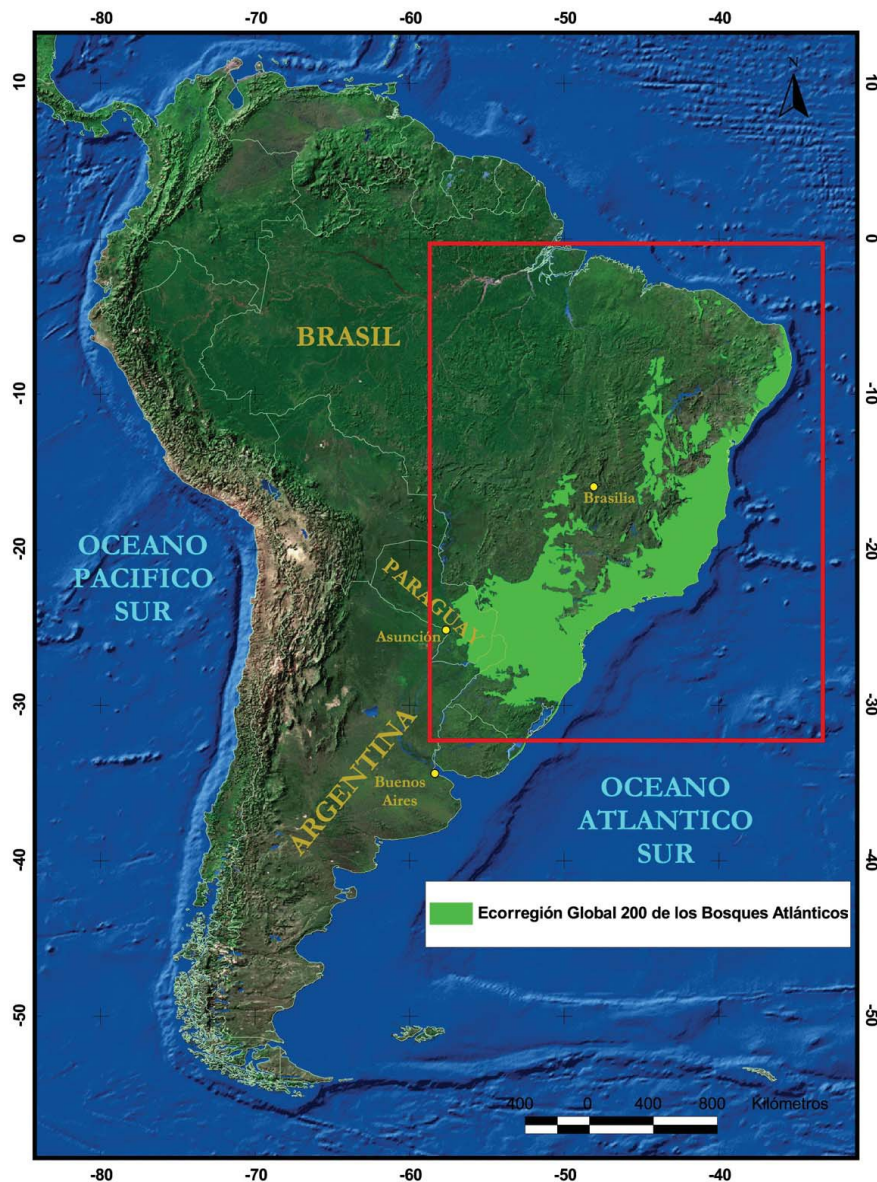


Fig. 1-1: Ecorregión Bosque Atlántico (Di Bitetti et al., 2003).

La porción sudoeste del BA constituye una subecorregión que ha sido denominada Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA) (Di Bitetti et al., 2003). En la Fig. 1-2 se observa la ubicación del BAAPA. Esta región juega un rol importante en la conservación del balance

hídrico de las cuencas regionales, asegurando la cantidad y la calidad de agua, ya que se ubica dentro de la Cuenca Alta del Río Paraná (de aquí en adelante denominada CARP) (Olson et al., 2001; Di Bitetti et al., 2003).

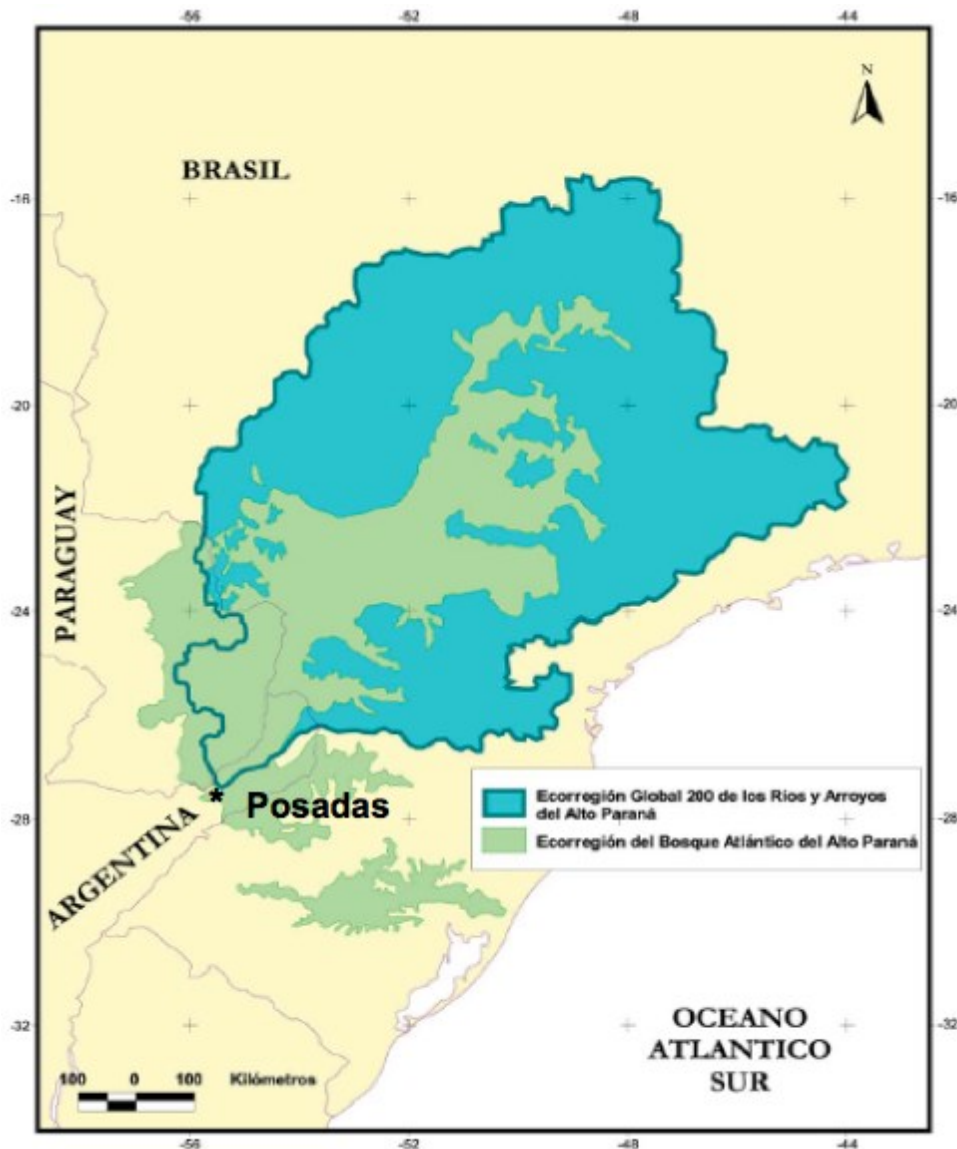


Fig. 1-2: Ecorregión BAAPA y CARP (Di Bitetti et al., 2003).

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 (Braga et al., 2003; Leite et al., 2012). Efectivamente, el cambio de uso de suelo se hizo evidente en Brasil a partir de los años 60, fundamentalmente en los estados de Mato Grosso do Sul,



Paraná y Sao Paulo, donde la producción intensiva de café fue drásticamente sustituida por cultivos anuales, tales como el maíz y la soja (Tucci y Clarke, 1998; García, 2000). Cabe mencionar que la planta de café es perenne mientras que los cultivos de maíz y soja son estacionales. Brasil incrementó rápidamente la producción de soja y otros cultivos, en base a una notable expansión del área sembrada (Schnepf et al., 2001).

En el Paraguay se desarrollaba un proceso similar de cambio en el uso del suelo, cuya mayor intensidad se dio a partir de inicio 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. Todo estos cambios provocaron la expansión de la agricultura mecanizada, especialmente de la soja, entre los años 1981 y 1999. Mediante imágenes LandSat, Huang et al. (2007) revelaron 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. Cabe resaltar que el embalse de ITAIPU, de unos  $29 \times 10^9$  m<sup>3</sup> de volumen, fue llenado en 15 días durante el mes de octubre aprovechando las grandes lluvias ocurridas en dicho año, es por esto que el impacto de la construcción de la obra fue muy bajo comparado con la envergadura de la misma

En la Argentina, según el Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente (2001), la superficie cubierta por el BAAPA para el año 2000 era de alrededor del 50% de su superficie original, y ésta continuó siendo reemplazada principalmente por cultivos de tabaco, té y yerba mate; además de cultivos forestales que ocupan grandes extensiones. Di Bitetti et al. (2003) presentan un mapa con la cobertura del BAAPA en los años 1970 y 1995-2000 que se reproduce en la Fig. 1-3.

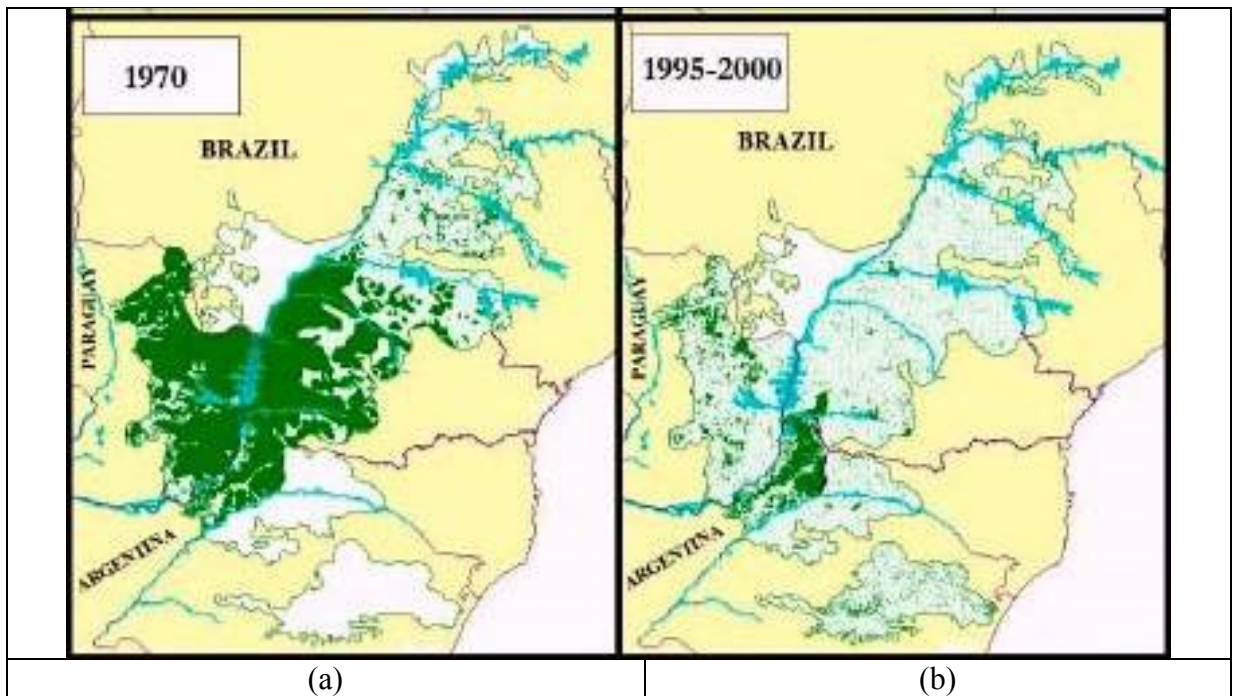


Fig. 1-3: Cobertura del BAAPA en 1970(a) y en 1995-2000 (b). Fuente: Di Bitetti et al. (2003).

En lo que se refiere a las variables hidrológicas, ya en 1997 Amarasekera et al. (1997) mostraron que las series de Q en Posadas y Corrientes estaban correlacionadas con las anomalías de la temperatura de la superficie del mar, que está asociado al fenómeno El Niño (ENOS). Luego Tucci y Clarke, (1998) 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.

Posteriormente Camilloni y Barros (2000; 2003) estudiaron el efecto del ENOS en los Q de la cuenca del Plata, en especial en eventos extremos, y encontraron que dos tercios de estos eventos corresponden al ENOS y los restantes a periodos neutros.

Según Braga et al. (2003) tanto P como Q evidencian un aumento en varias estaciones hidrométricas a lo largo del río Paraná a partir del año 1970.

En la cuenca del río Paraguay, Collischonn et al. (2001) analizaron datos de 20 estaciones hidrométricas, 36 estaciones pluviométricas y además 95 años de observaciones de nivel de agua en Ladario-Brasil, estación que se encuentra en la cuenca alta del río Paraguay. Los autores encontraron que el régimen fluvial durante 1960-1970 es diferente al régimen antes y después de dicho periodo, tanto para valores medios como en la correlación interanual de los niveles. Estos cambios en los niveles podrían explicarse por el aumento de las P en toda el área de la cuenca después de 1970. Por otro lado, los autores no encontraron correlaciones evidentes entre el régimen hidrológico del río Paraguay en territorio brasileiro y el ENOS.

Berbery y Barros (2002) analizaron los cambios ocurridos en la Cuenca del Plata entre dos periodos de 20 años (1951-1970 y 1981-1999) y encontraron que la P se incrementó un 16%. Estos cambios junto a los cambios de uso de suelo podrían haber contribuido a los cambios en los Q. Por otro lado, los autores mencionan, que los Q anuales medios de los dos periodos de 20 años no se verían afectados por el incremento del almacenamiento de las presas, ya que los cambios en la tasa de evaporación en la cuenca son relativamente pequeños debido a la superficie limitada de los embalses.

Costa et al.(2003) investigaron la cuenca del río Tocantins de unos 760.000 km<sup>2</sup> ubicada al norte de la cuenca del Plata en la ecorregión Cerrado. Determinaron un aumento del 24% en los Q medios para dos periodos diferentes, 1949-1968 y 1969-1998, periodos en los cuales se tuvo un aumento del área cultivada del 30% al 49% de la cuenca y donde las P no mostraron un aumento significativo.

García y Mechoso (2005) estudiaron 5 grandes cuencas de Sudamérica, entre ellas la cuenca del Plata, y encontraron que los Q de los grandes ríos presentan una tendencia a aumentar después de 1970. Los autores concluyen que la simultaneidad del aumento es reflejo del impacto del cambio climático, ya que todas las series de Q reflejaron el fenómeno ENOS. En el caso de la cuenca del Plata encontraron otras señales climáticas de periodicidad de 17 y 9

años. García y Mechoso (2005) sugieren que separar los impactos del cambio climático y cambio de uso de suelo en la cuenca del Plata requiere más investigación.

Krepper et al. (2008) utilizando el método Análisis Espectral Singular (SSA por sus siglas en inglés) determinaron la respuesta de la P y los Q en la CARP y en 5 de sus subcuencas. Según Krepper et al. (2008) la estructura temporal de las descargas en Posadas se caracteriza por una tendencia a partir de 1970 y dos señales moduladas. Estos autores observaron incrementos moderados e uniformes de las P medias (entre 6-9%) antes y después de 1970, en todas las subcuencas. Sin embargo, los cambios en la escurrentía media anual, antes y después de la década de 1970, aguas abajo de Sao Simao, no pueden ser explicadas solamente por el aumento de las medias anuales de la P. Los autores, sugieren que tales cambios serían atribuibles a un impacto antropogénico más que a uno climático. Posteriormente Krepper y Venturini (2009) utilizando también la metodología SSA estudiaron la respuesta de la CARP dividiéndola en 4 subcuencas denominadas P1, P2, P3 y P4. Los autores determinaron Q, P y coeficientes de escurrentía (C), medios anuales, de cada subcuenca para los periodos 1931-1970 y 1971-2000. Luego de un análisis riguroso, los autores observaron un aumento de C en la subcuenca P3 muy superior al aumento de las P. En contraste, para la cuenca P4, C decreció de un periodo al otro. Krepper y Venturini (2009) atribuyen el aumento de C en la subcuenca P3 a un posible efecto antrópico, especialmente al cambio en el uso del suelo.

En la cuenca del río Uruguay, Saurral et al. (2008) estudiaron el impacto del cambio de uso de suelo en los Q para el periodo 1960-2000. Utilizando un modelo hidrológico, determinaron que el aumento en los Q de la cuenca es atribuible al incremento de la P y no al cambio de uso de suelo. Cabe mencionar que en dicho caso se transformó de pasturas naturales a cultivos estacionales, principalmente.

Silveira y Alonso (2009), analizaron el cambio de uso de suelo y su influencia en los recursos hídricos en diferentes cuencas de Sudamérica confirmando las conclusiones de Bosch y Hewlett (1982).

Doyle y Barros (2011) 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.

Antico et al. (2014) analizaron la variabilidad hidro-climática de los Q de la cuenca del río Paraná en Corrientes. Ellos encontraron que los Q presentan ciclos anuales e intraanuales que reflejan las oscilaciones estacionales de la P de distintos sectores de la cuenca; además de cambios interanuales e interdecadales asociados a oscilaciones del clima (e.g., El Niño/Oscilación del Sur). La tendencia no lineal del Q revela un aumento gradual que podría estar asociado al calentamiento global y a cambios en el uso del suelo.

Antico et al. (2014) determinaron diez modos o componentes (C1-C10), donde los modos C1 al C4 reflejan ciclos de hasta 1 año de frecuencia. C5 y C6 están correlacionados con los cambios interanuales de El Niño/La Niña y C7 es un ciclo decadal que está relacionado con la Oscilación del Atlántico Norte. La varianza explicada para los modos C5, C6 y C7 son 9,6%, 6,8% y 8,3% respectivamente.

En otras regiones del mundo también se analizaron los efectos del cambio del uso del suelo en la repuesta de los ríos. Por ejemplo Siriwardena et al. (2006) estudiaron la cuenca del río Comet en Australia (16.400 km<sup>2</sup>), que sufrió un gran cambio de su cobertura forestal por pasturas y cultivos. Los autores encontraron que luego del cambio de uso de suelo hubo un aumento del 78% en los Q, que en parte puede ser explicado por un aumento del 8,4% de la P. Utilizando un modelo a escala anual encontraron que el aumento de los Q debido solo al cambio de uso de suelo sería del 58%. Mediante un modelo de transformación lluvia-caudal a escala diaria determinaron que el aumento del Q debido al cambio de uso de suelo sería del 40%.

Li et al. (2009) investigaron la cuenca de Heihe en China (1506 km<sup>2</sup>), donde encontraron que durante 1981-2000 aproximadamente el 4,5% de la cuenca pasó de tener arbustos medianos a pastizales y que el clima se tornó más cálido y seco. Los efectos integrados del cambio de uso del suelo y la variabilidad climática se manifestaron en una reducción de los Q, del contenido de agua del suelo y de la evapotranspiración (ET). Según los autores, la variabilidad climática impactó de forma más significativa que el cambio de uso del suelo en la cuenca de Heihe.

El cambio del uso del suelo no solo afecta los Q, sino que influye en otras variables del ciclo hidrológico. En cuanto a la influencia del cambio de uso de suelo en la P, se encuentran controversias en las investigaciones publicadas. André et al. (1989) postula que no existe relación entre la cobertura boscosa y la P. Pielke et al.(1998) confirman el análisis realizado por André et al. (1989). Por otro lado Shukla et al. (1990) y Nobre et al. (1991) estudiaron la región Amazónica con modelos de circulación global de la atmósfera (GCMs, por sus siglas en inglés). En general estos autores concluyen que la P decrece con la deforestación como resultado de una disminución de la ET y la conducción de humedad. Braga et al. (2003) mencionan que la circulación de aire regional es la que origina las P locales, esta circulación no es significativamente afectada por los cambios de cobertura vegetal. Bruijnzeel (2004), considera que la mayor ET y rugosidad aerodinámica de los bosques, en comparación con los pastos y los cultivos, daría lugar a un aumento de la humedad atmosférica y por lo tanto a una mayor probabilidad de formación de nubes y P. El contenido de humedad del suelo puede ejercer una notable influencia sobre la atmósfera en contacto con el mismo, a través de los flujos de agua y energía. La utilización del modelo regional desarrollado por el Rossby Centre (RCAs por sus siglas en inglés), que pone énfasis en el contenido de humedad del suelo, ha permitido determinar que en la cuenca del Plata, la P es parcialmente controlada por el contenido de humedad del suelo, especialmente entre los meses de noviembre a enero (Avisar y Werth, 2005; Sörenson et al., 2010). Sin embargo Lee y Berbery (2012) muestran que la deforestación y el reemplazo de las pasturas naturales por cultivos implica cambios en

las propiedades biofísicas de la superficie terrestre que pueden tener efectos en el clima. Lee y Berbery (2012) modelando diferentes escenarios de expansión de la agricultura en la cuenca del Plata determinaron diferentes respuestas climáticas a los cambios en la cobertura del suelo en función de la región. En general, concluyeron que la reducción de la rugosidad genera vientos de superficie más fuertes que resultan en una disminución de la P.

La literatura demuestra que en los últimos 50 años se han realizado estudios para cuantificar el impacto que el cambio de la cobertura vegetal produce en el balance hídrico de una cuenca (Hewlett y Hibbert, 1967; Bosch y Hewlett, 1982; Bruijnzeel, 1990; Wilk, et al., 2001; Costa et al., 2003; García y Mechoso, 2005; Siriwardena et al., 2006; Saurral et al., 2008; Li et al., 2009; Silveira y Alonso, 2009; Doley y Barros, 2010; Lee y Berbery, 2012).

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 (Tucci y Clarke, 1998; Braga et al., 2003; García y Mechoso, 2005; Krepper et al., 2008; Krepper y Venturini, 2009; Doyle y Barros, 2011; Antico et al., 2014). Esta tesis se basa en la hipótesis de que los cambios en el uso del suelo generan una respuesta de largo plazo (permanente o semipermanente) en los Q, cuyo origen no puede ser atribuido exclusivamente a factores climáticos.

## **1.1 Objetivos de la tesis**

**El objetivo principal de esta tesis 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 alta del río Paraná (CARP), en la región que originalmente cubría el Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA).**

Los objetivos específicos son:

1.-Determinar cuando y donde ocurren los cambios de uso de suelo en las subcuencas del río Paraná, pertenecientes al BAAPA, utilizando datos de diferentes sensores remotos, por medio de herramientas de análisis espacial de datos que posibiliten la clasificación y cuantificación de los mismos.

2.-Determinar la respuesta en los caudales producidos por los cambios de uso de suelo de la cuenca, teniendo en cuenta las relaciones entre precipitación-uso del suelo-caudal.

3-Characterizar la variabilidad de los caudales (Q), de la precipitación (P) y la evapotranspiración (ET) en las subcuencas de la CARP pertenecientes al BAAPA.

## **1.2 Estructura de la tesis**

El documento se organiza como sigue: en el **Capítulo 2** se presenta la metodología adoptada en esta tesis, la cual consiste en la determinación de las señales de baja frecuencia en las series hidrometeorológicas, esto se realiza utilizando el Análisis Espectral Singular, además de análisis estadísticos y de regresión para determinar la relación precipitación-uso del suelo-caudal. En el **Capítulo 3** se presentan los datos hidrometeorológicos, cartográficos del área de estudio e información teledetectada utilizada en la tesis. Se describen además los productos obtenidos por otros autores que fueron utilizados en esta tesis. En el **Capítulo 4** se detalla la clasificación de los usos de suelo en diferentes cuencas, así como los cambios producidos en diferentes periodos. Para esto se utilizan imágenes y productos satelitales provenientes de diferentes sensores. Se analiza la ET para la última década empleando productos de los satélites Terra y Aqua. En los **Capítulos 5 y 6** se presenta un análisis estadístico de las series de P, T y Q de la subcuenca P3 BAAPA y P4, respectivamente. Se utiliza la metodología SSA, con el cual se obtienen las señales que conforman cada serie de datos, donde se analiza principalmente la señal de baja frecuencia. Por último se determina la relación entre el balance hídrico y el uso de suelo. Finalmente en el **Capítulo 7** se presentan las conclusiones del trabajo de Tesis.



## Capítulo 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 usan análisis estadísticos.

En la primera categoría se encuentran los estudios que han analizado la respuesta hidrológica a la deforestación realizados por Wilk et al. (2001); Siriwardena et al. (2006); Li et al. (2009); Mao et al. (2009) y Zhang et al. (2014). Particularmente en la CARP se pueden mencionar los trabajos de Saurral et al. (2008) y Bayer y Collischonn, (2013a, 2013b) quienes analizaron el efecto de la deforestación y el avance de la agricultura en Sudamérica en las variables hidrológicas.

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. Costa et al. (2003); Bi et al. (2009); Liu et al. (2010); Li et al. (2010) y Liu et al. (2014) estudiaron los efectos del clima y el cambio del uso de suelo en los caudales de grandes cuencas utilizando alguno de estos métodos. En la CARP se destacan las investigaciones de Collischonn et al. (2001); García y Mechoso, (2005); Krepper et al. (2008); Krepper y Venturini, (2009); Doyle y Barros, (2011) y Antico et al. (2014).

En esta tesis se requiere un método que no necesite de la calibración de parámetros ni de la modelación de variables atmosféricas de difícil adquisición. Para esto, los métodos estadísticos ofrecen la posibilidad de estudiar la dinámica espacio-temporal de las variables sin representar la física de las transformaciones que sufren. Por eso se considera que el método de componentes principales y los métodos derivados son adecuados para cumplir los objetivos. Estos métodos se basan en representar las fluctuaciones o variaciones de una variable, en el espacio y/o tiempo, como la suma de una serie de funciones.

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 (Allen y Smith, 1996). El comportamiento altamente complejo del sistema climático, tanto como su naturaleza no lineal, proveen un desafío real para los métodos que se apliquen en el análisis de los datos. Allen y Smith, (1996) mencionan que la elección del método más apropiado resulta crucial cuando el objetivo de la investigación es encontrar señales específicas en el tiempo, el espacio, o simultáneamente en el espacio y el tiempo. 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 (Gámiz-Fortis et al., 2002; Krepper et al., 2008; Krepper y Venturini, 2009), b) inferir mecanismos físicos a partir de las señales detectadas para construir modelos numéricos (Hidalgo-Muñoz, 2015), c) validar modelos numéricos comparando las características fundamentales de los datos generados con los observados (Hidalgo-Muñoz, 2015), y d) utilizar las señales en si mismas, para pronosticar el comportamiento del sistema en el futuro (Palus y Novotná, 2006; Gámiz-Fortis et al., 2010, 2011a, 2011b).

En base a los resultados obtenido por Krepper et al. (2008) y Krepper y Venturini (2009), quienes reportaron aumentos en los Q y C para la subcuenca P3 a diferencia de los de la cuenca P4 que disminuyeron, en esta tesis se propone continuar el análisis con métodos estadísticos y el método SSA en las 2 subcuencas, a una escala de datos anuales de las variables del balance hídrico. Teniendo en cuenta la hipótesis formulada en esta tesis 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 (Brutsaert, 2005):

$$ET \approx P - Q \quad \text{Ec. 2-1}$$

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, a fin de determinar la respuesta en los caudales producidos por el cambio de uso de suelo.

## 2.1 Test estadísticos

Con el objetivo de establecer significancias estadísticas en las series se realizan análisis estadísticos clásicos como el test de Students o z-test para determinar la significancia estadística de medias y varianzas de los datos en dos periodos diferentes.

Para determinar las tendencias significativas en las series de datos, se utiliza el test no paramétrico de Mann-Kendall (Kendall y Stuart, 1967; Mann, 1945). Este análisis se realiza utilizando el Seasonal Mann-Kendall Test (Hirsch et al., 1982; Hirsch y Slack, 1984, Helsel et al., 2006), herramientas desarrolladas por el USGS (Servicio Geológico Americano, por sus siglas en inglés) inicialmente para analizar tendencias en la calidad de agua superficial en los Estados Unidos en 1980.

El test de Mann-Kendall primeramente determina el factor K que se obtiene sumando los signos de la diferencia entre 2 valores sucesivos de la serie, es decir K representa el numero de diferencias positivas menos las diferencias negativas. Luego el factor K es comparado con un valor crítico de K; si se excede este valor existe una tendencia significativa.

$$K = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_{jk}) \quad \text{Ec. 2-2}$$

Se calcula el valor z-score que está basado en la relación de K y su varianza. Si la probabilidad asociada con el valor z-score (p z-score) es menor o igual a 0,1 entonces la

tendencia es considerada significativa siendo esta creciente si el valor de  $K$  es positivo y decreciente si este es negativo. Mayor información sobre la herramienta del USGS se encuentra en <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5275/>.

## 2.2 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 (Vautard y Ghill, 1989; Ghill y Vautard, 1991; Vautard, 1995; Golyandina et al., 2001). Cabe mencionar que el SSA se ha convertido en un método estándar en la investigación del clima (Palus y Novotná, 2006; Krepper y Venturini, 2009; Gámiz-Fortis et al., 2011b; Hernández-Martínez et al., 2014, Hidalgo-Muñoz et al., 2015).

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. El SSA también permite analizar series de tiempo cuando se tienen datos faltantes.

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  $M \times M$  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  $|i-j|$  (Vautard y Ghil, 1989).

Los  $M$  autovectores ( $E_k$ ) de la matriz  $C_X$  son llamadas funciones empíricas ortogonales temporales (EOFs, por sus siglas en inglés). Los autovalores  $\lambda_k$  de la matriz  $C_X$  cuantifican la

varianza parcial en la dirección de  $E_k$  y la suma de los  $\lambda_k$  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  $\lambda_k$  similares o iguales y las  $A_k$  asociadas a ellos están aproximadamente en cuadratura (Ghil et al., 2002). 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 (Ghil et al., 2002).

Un aspecto importante de este método está en el ancho de la ventana de trabajo  $M$ , la que determina la máxima periodicidad que captura el SSA. En general, se recomienda una ventana ( $V$ ) aproximadamente  $V \leq n/3$  siendo  $n$  la cantidad de datos (Vautard y Ghil, 1989).

La serie  $X(t)$  se puede reconstruir en su totalidad o parte de ella usando una combinación lineal de las  $A_k$  y EOFs. (Ghil et al., 2002). Mayores detalles de la metodología SSA se presentan en el Anexo 1.

### **2.3 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 por Doyle y Barros (2011) con buenos resultados, por lo que en esta tesis 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. 2-3.

$$F_i = f(P_i) + O_i \quad \text{Ec. 2-3}$$

donde F representa la contribución de caudales de la cuenca para cada año i,  $\epsilon_i$  (P<sub>i</sub>) representa los procesos en función de la precipitación y O<sub>i</sub> los procesos independientes de la precipitación. Esta ecuación se ajusta a una relación lineal de la forma:

$$Q_i = a \times P_i + b + \epsilon_i \quad \text{Ec. 2-4}$$

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  $\epsilon_i$  corresponde a todos los procesos que contribuyen al Q y son independientes de la P. La  $\epsilon_i$  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 ( $a \times P_i + b$ ). Los valores de  $\epsilon_i$  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.

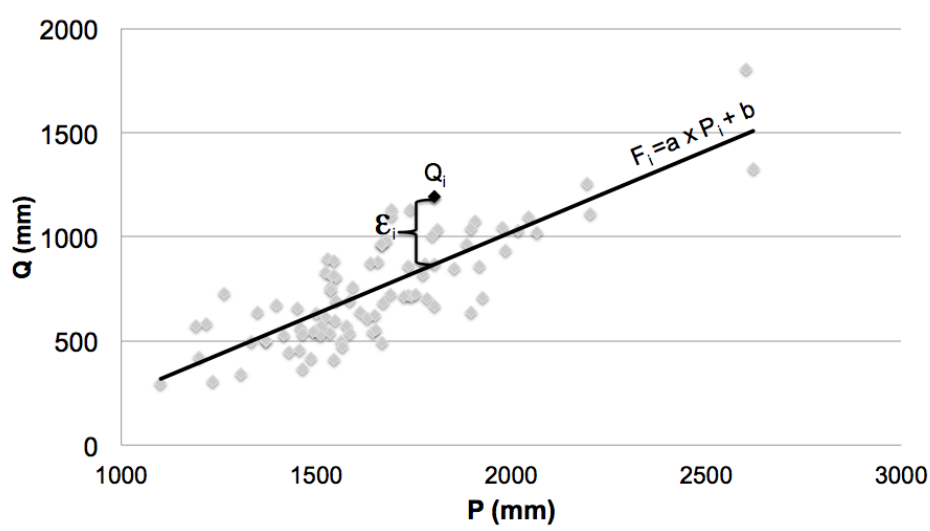


Fig. 2-1: Ejemplo determinación de parámetros de la Ec. 2-4

Se determinan dos periodos de trabajo, 1 y 2, para detectar el cambio de los Q entre ellos. Así, con la Ec. 2-4 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 ( $\epsilon_2 - \epsilon_1$ ), según la Ec. 2-5.

$$Q_2 - Q_1 = a \times (P_2 - P_1) + \epsilon_2 - \epsilon_1 \quad \text{Ec. 2-5}$$

### **Capítulo 3: Área de estudio y datos disponibles**

La mayor parte de la cuenca del río de La Plata se encuentra en el sur de Brasil, donde ocupa 1.415.000 km<sup>2</sup>; mientras que en Argentina ocupa 920.000 km<sup>2</sup>; en Paraguay cubre 410.000 km<sup>2</sup>; solo 205.000 km<sup>2</sup> están sobre territorio Boliviano y 150.000 km<sup>2</sup> pertenecen al Uruguay, cubriendo gran parte de dicho país (García y Vargas, 1996).

El total de la población de la cuenca es superior a los 100 millones de personas concentrados en las grandes ciudades, solo un 13% de la población vive en áreas rurales (UNESCO-WWAP, 2007). Hidrográficamente, la cuenca contiene cuatro subcuencas muy bien diferenciadas: la cuenca del río Paraná, la cuenca del río Uruguay, la cuenca del río Paraguay y la del río de la Plata propiamente dicho.

Según, García y Vargas (1996) la porción de la cuenca del río Paraná al norte de la ciudad de Posadas se define como CARP. Sin embargo Camilloni y Barros (2003) delimitan con el mismo nombre, la porción de la cuenca aguas arriba de la ciudad de Corrientes incluyendo al Río Paraguay.

En esta tesis se adoptó como zona de estudio la CARP definida por García y Vargas (1996), que coincide con la definida por Olson et al. (2001) y Di Bitetti et al. (2003), dentro de la cual el BAAPA juega un rol importante en la conservación del balance hídrico, como se citó anteriormente (Fig. 3-1).

La CARP hasta la ciudad de Posadas cubre un área de aproximadamente 993.360 km<sup>2</sup>, con el 90% de la misma en el Brasil y el resto en Paraguay y Argentina. Sobre dicha cuenca se encuentran varios estados del Brasil, departamentos del Paraguay y provincias de Argentina, con los mayores Productos Brutos Internos de los tres países (una alta producción industrial, agrícola e hidroenergética).

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 km<sup>2</sup>, extendiéndose desde

las laderas occidentales de la Serra do Mar en Brasil hasta el este de Paraguay y la provincia de Misiones en Argentina.

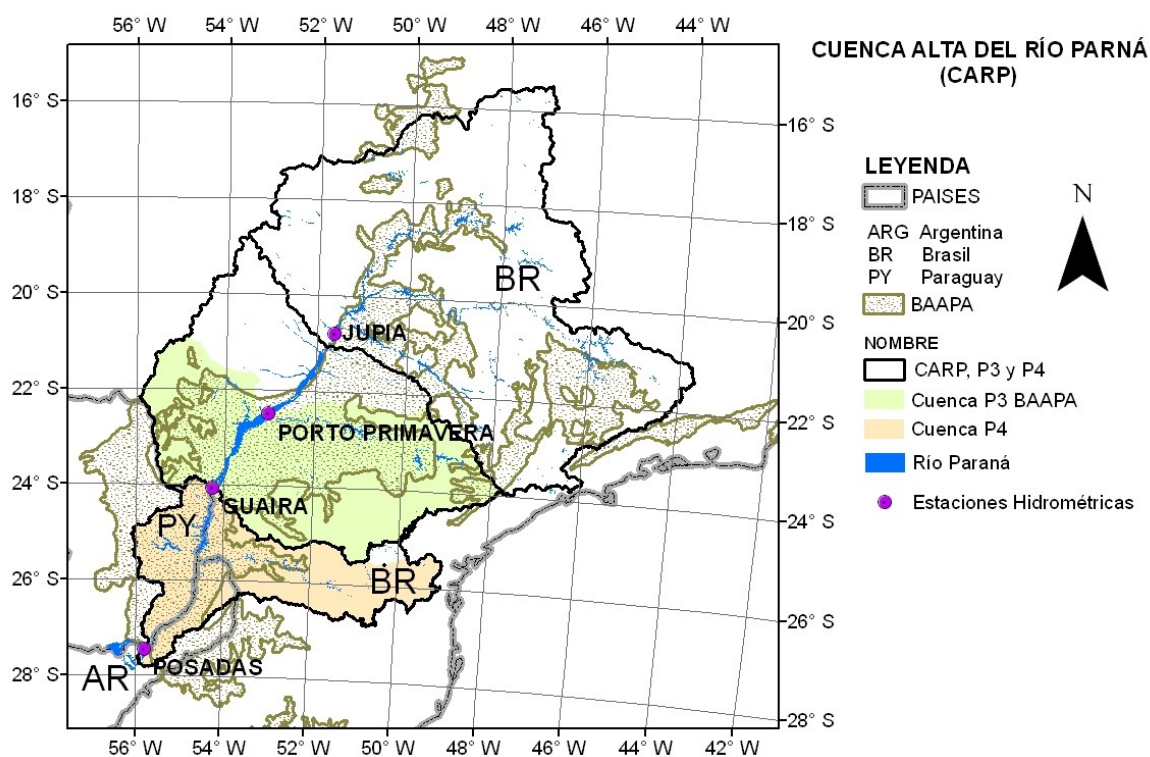


Fig. 3-1: Subcuencas de la CARP, BAAPA y estaciones hidrométricas que definen dichas cuencas, en colores cuencas de estudio definidas.

Según Di Bitetti et al. (2003) hacia el norte el BAAPA limita con los bosques y sabanas del Cerrado, hacia el oeste limita con el Pantanal y el Chaco Húmedo, hacia el sur limita con un área de pastizales, y finalmente hacia el este, se entremezcla con los Bosques de Araucaria. El límite con la ecorregión de los Bosques de Araucarias no está claramente definido; a veces es difícil determinar dónde comienza una ecorregión y termina la otra. Ambas ecorregiones han sido a menudo clasificadas como una sola. La vegetación predominante en la ecorregión del Alto Paraná es el bosque subtropical semi-deciduo. Las variaciones en el ambiente local y el tipo de suelo permiten la existencia de diferentes comunidades vegetales — bosques en galería, selvas de bambú, bosques de araucaria. La Ecorregión del BAAPA se encuentra situada sobre una gran porción de uno de los mayores reservorios de aguas subterráneas del mundo, el Acuífero Guaraní.



Según Di Bitetti et al. (2003) la ecorregión tiene un clima subtropical, la T media anual es de 16-22 °C con una variación anual relativamente alta, las P en la región varían entre 1.000 a 2.200 mm por año, generalmente con menos P en la parte norte de la ecorregión que en la parte sur. Según Pereira et al. (2010) el BA en la región de Mantiqueira Range (sureste del estado de Minas Gerais) tiene una ET que corresponde al 89% de la P.

En la metodología se define trabajar con las series hidrológicas de las subcuencas P3 y P4 definidas por Krepper y Venturini (2009). Dentro de la subcuenca P3 además del BAAPA se encuentra al norte la Ecorregión del Cerrado y al sur la de los Bosques de Araucarias, así como se citó anteriormente, este último de características muy similares al BAAPA. De forma a extraer las áreas pertenecientes al Cerrado de la subcuenca P3, se fija como inicio del tramo del río Paraná la Estación Porto Primavera para considerar el área de estudio de la subcuenca P3 mayoritariamente en ecorregiones similares al BAAPA. Esta cuenca se define con el nombre de subcuenca P3 BAAPA con una superficie de 223.407 km<sup>2</sup>. La subcuenca P4 está definida por aquellas cuencas afluentes al río Paraná entre las estaciones de Posadas y Guaira con una superficie de 127.695 km<sup>2</sup> ( Fig. 3-1).

En la subcuenca P3 BAAPA además se analiza la cuenca del río Paranapanema en la estación Rosana, esta cuenca representa el 44% de la subcuenca P3 BAAPA. En este caso se dispone de datos de Q en las estaciones de Jataizinho en el río Tibaji, con un área de drenaje de 22.000 km<sup>2</sup> y la estación Andira, en el río das Cinzas con área de drenaje de 5.600 km<sup>2</sup>. La ubicación de las estaciones se muestra en la Fig. 3-2.

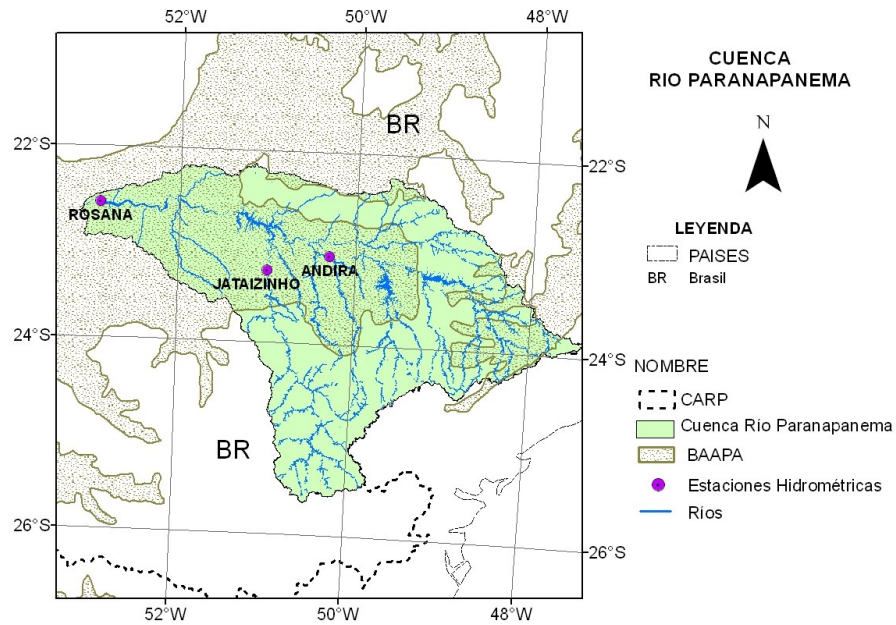


Fig. 3-2: Ubicación estaciones hidrométricas en la cuenca del río Paranapanema.

La subcuenca P4 presenta una particularidad dentro de la CARP, está conformada por la cuenca del río Iguazú de unos 65.000 km<sup>2</sup>, representando el 51% de la subcuenca P4 y la otra mitad del área se encuentra distribuida en cuencas más pequeñas afluentes al río Paraná.

La cuenca del río Iguazú aporta 1609 m<sup>3</sup>/s de los 3.036 m<sup>3</sup>/s producidos en promedio para el periodo 1942-2009 en la subcuenca P4, es decir que también la mitad del caudal se produce en la cuenca del río Iguazú. El área de drenaje se encuentra principalmente en Brasil, ubicada dentro del BAAPA solo una fracción de su cuenca baja, el resto de la cuenca se encuentra dentro de la ecoregión de los Bosques de Araucaria (Fig. 3-3).

Las demás cuencas afluentes al río Paraná, a excepción de la cuenca del río Iguazú, se encuentran mayoritariamente dentro del BAAPA, a todas estas subcuencas agrupadas, ubicadas en el sector oeste de la subcuenca P4 se les llama subcuenca P4 Oeste de aquí en adelante (Fig. 3-3). La superficie de la subcuenca P4 Oeste se encuentra 62% en Paraguay, 25% en la Argentina y 13% en el Brasil. Una de las cuencas que conforman la subcuenca P4 Oeste es la cuenca del río Ñacunday de unos 2.500 km<sup>2</sup>, esta cuenca además de ser la menor de todas las cuencas analizadas se encuentra íntegramente en Paraguay.

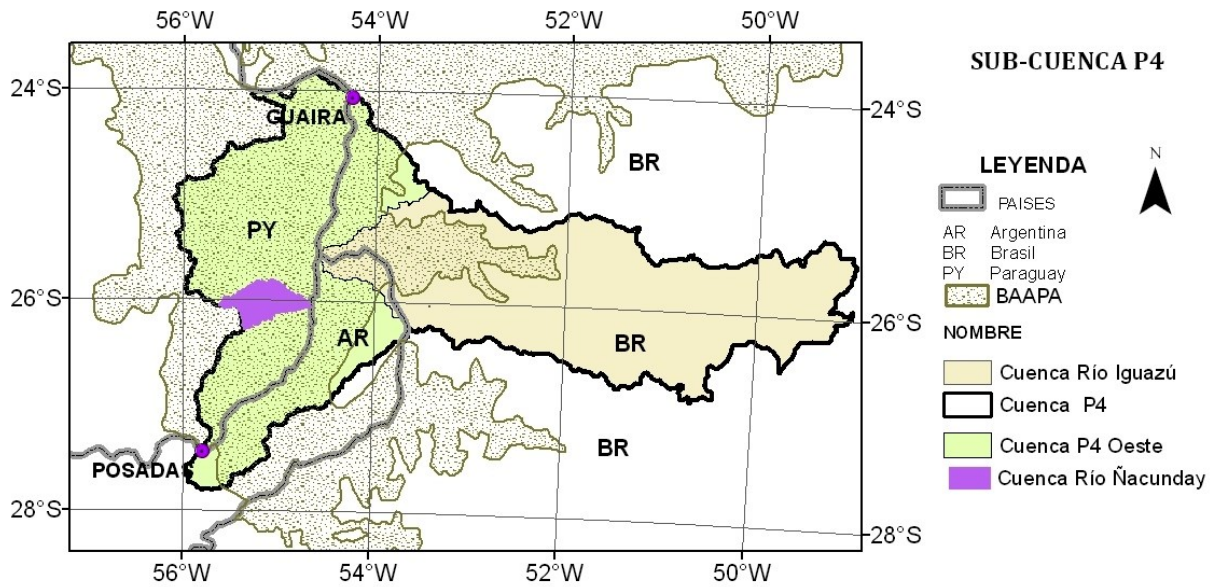


Fig. 3-3: Subcuenca P4 y cuencas de estudio dentro de la misma y cobertura del BAAPA.

### 3.1 Datos de caudales

Los datos de Q se obtienen de las diferentes instituciones y fuentes de información en los 3 países involucradas en la CARP. Los nombres que se utilizan en la tesis son los nombres indicados por cada país e institución para cada estación hidrométrica.

Los datos de Q de Argentina se obtienen del Sistema Nacional de Información Hídrica el cual cuenta con una página web desde la cual se pueden acceder a los datos <http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmInicial.aspx>. Se extraen los datos de la estación ubicada en la ciudad de Posadas para el periodo 1900-2000.

De la Entidad Binacional Yacyreta se obtienen datos del río Paraná hasta el año 2010 en la estación Posadas. En la Tabla 3-1 se presenta la información referente a las estaciones que se utilizan.

Tabla 3-1: Estaciones hidrométricas en territorio argentino.

Estación	Código	Río	Latitud	Longitud	Periodo
Posadas	3402	Paraná	27° 25' 37"	55° 47' 31"	1900-2000
Posadas	EBY	Paraná	27° 25' 37"	55° 47' 31"	2000-2010

Los datos de Q de las estaciones hidrométricas en el Brasil se obtienen de la base de datos Hidroweb, administrada por la Agencia Nacional de Aguas <http://hidroweb.ana.gov.br>. El

Operador Nacional del Sistema Eléctrico del Brasil (ONS) cuenta con un informe técnico y una base de datos de los Q naturalizados para los emprendimientos hidroenergéticos del Brasil (ONS, 2012). Esta base de datos posee información para el periodo 1931-2011 a escala mensual. Las estaciones que se utilizan de ambas bases de datos son las presentadas en la Tabla 3-2.

Para el río Iguazú se rellenan los datos de la estación Salto Cataratas (PCD) utilizando las otras estaciones del mismo río para lo cual se emplean los programas trans.for y preenche.for elaborados por el Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS).

Tabla 3-2: Estaciones hidrométricas utilizadas en territorio brasileiro.

Estación	Código	Río	Latitud	Longitud	Periodo
Guaira	64843000	Río Paraná	24° 04'	54° 15'	1920-2009
Salto Cataratas-PCD	65993000	Río Iguazú	25° 41'	54° 26'	1942-2005
Salto Cataratas-SIMEPAR	65993001	Río Iguazú	25° 41'	54° 26'	2003-2009
Porto Capanema-PCD	65987000	Río Iguazú	25° 34'	53° 56'	1977-2009
Salto Caxias	ONS	Río Iguazú	25° 32'	53° 30'	1931-2010
Porto Primavera	ONS	Río Paraná	22° 30'	53° 01'	1931-2010
Rosana	ONS	Paranapanema	22° 35'	52° 53'	1931-2010
Jataizinho	ONS	Paranapanema	23° 15'	50° 59'	1931-2010
Andira	ONS	Paranapanema	23° 05'	50° 19'	1931-2010

Los datos de Q en Paraguay 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”. En este proyecto se recopiló, verificó y relleno todos los datos de Q disponibles en Paraguay hasta el año 2010. En la Tabla 3-3 se detallan las estaciones que se utilizan sobre territorio paraguayo.

Tabla 3-3: Estaciones hidrométricas en territorio paraguayo.

Estación	Río	Latitud	Longitud	Periodo
BALSA	Río Ñacunday	26° 16'	54° 44' 42"	1942 a 2010

La ubicación y distribución de las estaciones utilizadas en la CARP se encuentran en la Fig. 3-4. Los datos anuales de las estaciones se encuentran en el Anexo 2.

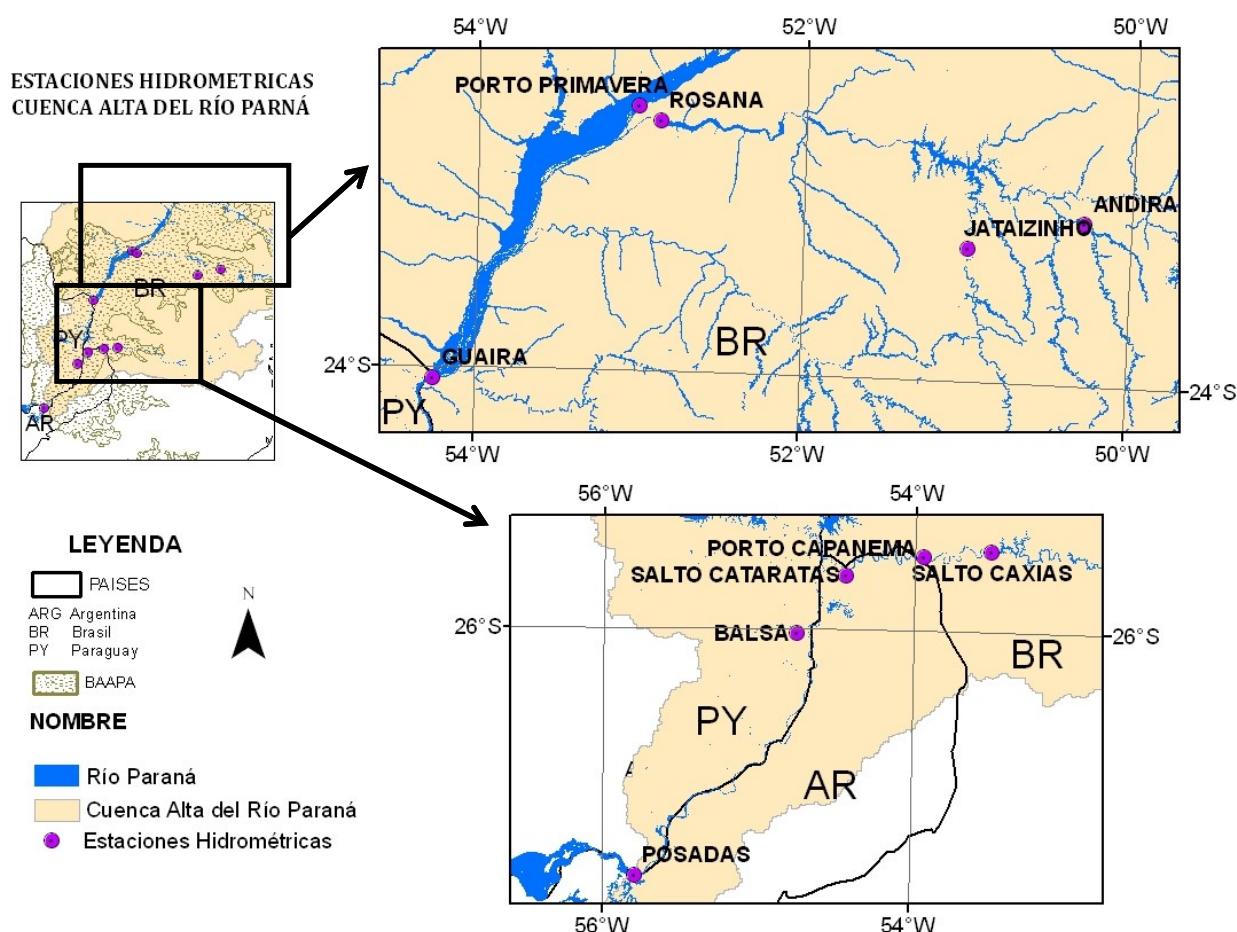


Fig. 3-4: Ubicación de las estaciones hidrométricas utilizadas en la investigación dentro de la CARP.

Con el objetivo de definir el año a utilizar en la definición del caudal anual, ya sea este año calendario o hidrológico, con los datos de caudales se determina el ciclo anual de los Q medios mensuales. En base al comportamiento de los Q del río Paraná (Fig. 3-5) se considera el valor anual correspondiente al año hidrológico, iniciándose este en setiembre y finalizando

en agosto del año siguiente, en estos meses se tienen los menores Q en el año. Esta misma consideración se tomara para todas las series de datos analizadas en este trabajo (Q, P, T, ET).

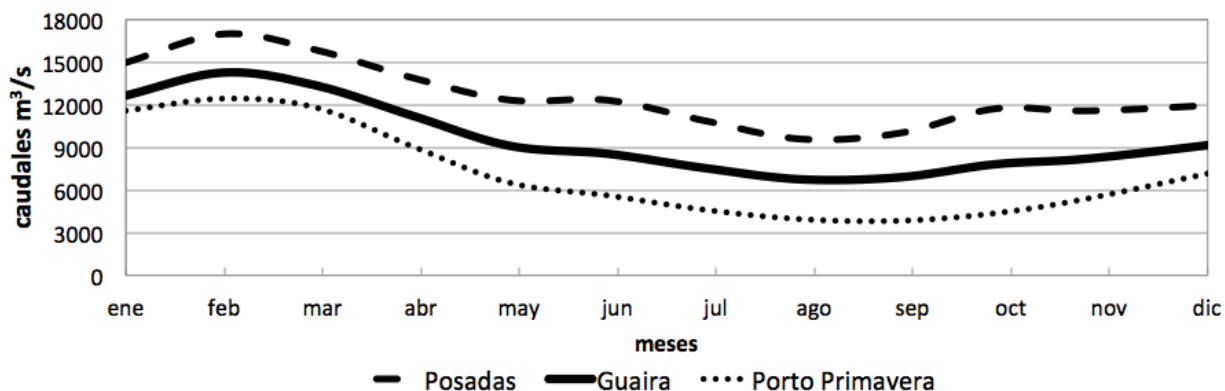


Fig. 3-5: Ciclo anual de los Q medios mensuales en Posadas, Guaira y Porto Primavera, en m<sup>3</sup>/s.

### 3.2 Datos de precipitación y temperatura

En lo que se refiere a datos de P y T 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](http://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, New et al. (1999) construyeron 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. 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. A grandes rasgos, las series temporales de las estaciones meteorológicas se expresan en términos de anomalías relativas a un periodo base de referencia: 1961-1990, se interpolan estas anomalías sobre una grilla, en lugar de interpolar los valores absolutos de las variables y se combinan finalmente con una

grilla de normales sobre el mismo periodo base. Estas bases de datos fueron actualizadas para nuevos periodos por diferentes autores (New et al., 2000, 2002; Mitchell et al., 2004; Mitchell y Jones, 2005), la versión utilizada es la CRU TS 3.1. La misma puede accederse desde <http://www.cgiar-csi.org/data/uea-cru-ts-v3-10-01-historic-climate-database>.

Costa et al. (2003), Krepper et al. (2008), Krepper y Venturini (2009), Lee y Berbery (2012) entre otros autores utilizaron la base de datos CRU en diferentes trabajos, tanto de la cuenca del Plata como en otras cuencas de Sudamérica.

Además se cuenta con datos de P pertenecientes a los organismos oficiales de los tres países. Los organismos encargados de recolectar estos datos son los Servicios Meteorológicos, Agencias Nacionales y Estatales o Provinciales del agua en los diferentes países, esta información es utilizada para verificar la consistencia de los datos de CRU, análisis que se encuentra en el Anexo 3.

Para determinar la serie de la P media y T media en cada cuenca o área de estudio, se identifican las celdas de CRU que corresponden a cada cuenca. Con estas celdas se calcula la media aritmética de los valores de P(T) de cada mes y con esto se obtiene la serie de valores mensuales de la cuenca o del área de estudio para el periodo de datos. En la Tabla 3-4 se indican las cantidades de celdas que pertenecen a cada subcuenca y cuenca de las áreas de estudio dentro de CARP. Los datos anuales de P se encuentran en el Anexo 2.

Tabla 3-4: Cantidad de celdas para cada cuenca y subcuenca de estudio dentro de la CARP.

Cuenca	Celdas Base de datos CRU
P3 BAAPA	101
P4	72
P4 Oeste	41
Paranapanema	48
Iguazu	24

### 3.3 Datos cartográficos

Se adoptó el sistema de información geográfica del USGS, para obtener la información cartográfica de toda la cuenca del Plata. Se utilizan los archivos de cuencas y ríos elaborados



dentro del proyecto HYDRO1k (Verdin, 2011). Se adoptó esta cartografía para tener la información de una sola fuente ya que el detalle y actualización de la cartografía es diferente para cada uno de los 3 países. Sin embargo, también fue necesario recurrir a la cartografía local y regional para el estudio de pequeñas cuencas.

Además se verificaron las cuencas determinadas en el proyecto HYDRO1k con las definidas con otra cartografía, como ser las delimitaciones de cuencas realizadas por las instituciones ambientales de los países, y no se encontraron diferencias apreciables en los límites de las cuencas.

En la Fig. 3-6 se presenta el mapa con la hidrografía de las subcuencas que se estudian en esta tesis. Cabe recordar que las 5 subcuencas mencionadas en la Fig. 3-6 están dentro de las denominadas P3 BAAPA y P4.

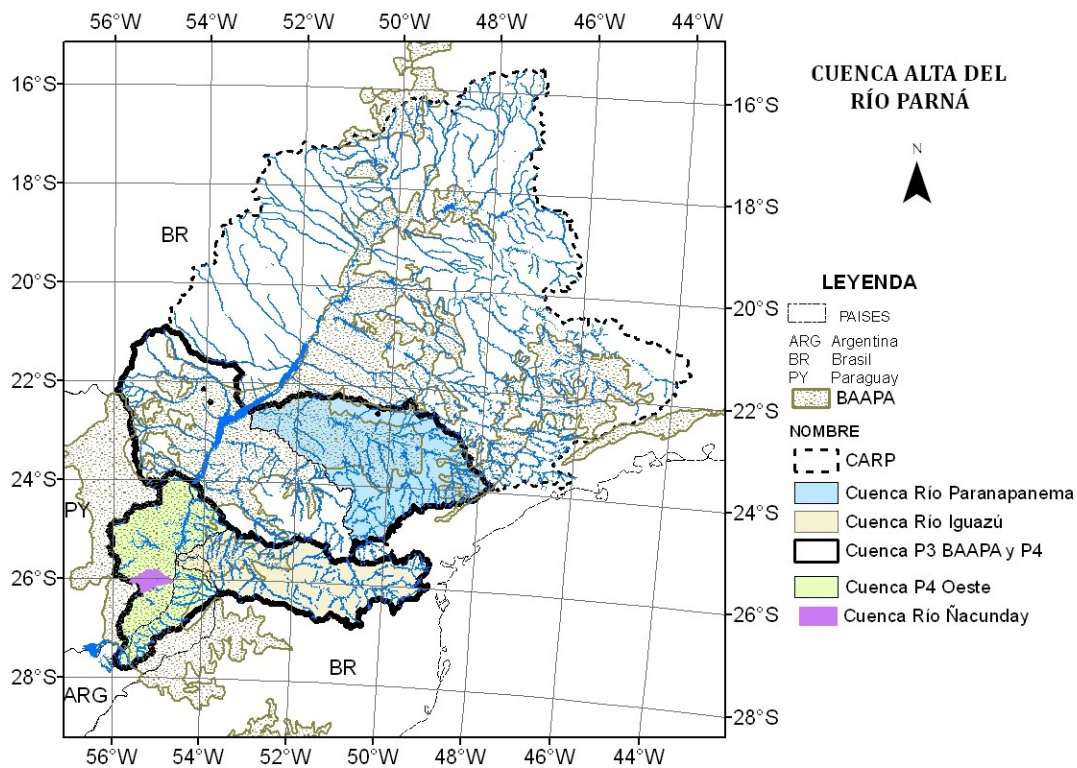


Fig. 3-6: Cuencas de estudio dentro de la CARP y el BAAPA con la red de drenaje principal

### 3.4 Datos remotamente sensados

El uso de imágenes satelitales para determinar cambios en el uso de suelo, data de principios de la década del '70 cuando se obtuvieron las primeras imágenes satelitales. Desde ese



entonces se desarrollaron diversas técnicas y metodologías que han sido descritas por numerosos autores (Coppin y Bauer, 1996; Cohen et al., 1996; Hansen y DeFries, 2004; Boyd y Danson, 2005; Zhang et al., 2009).

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.

Según Hansen y DeFries (2004) el monitoreo de cobertura de bosques requiere típicamente información de resolución espacial fina, como las provistas por la serie de satélites LandSat, cuyas imágenes de las bandas visibles tienen píxeles de 900 m<sup>2</sup>. La principal limitación de estos satélites es el periodo de revisita a cada lugar y la dificultad propia de fusionar imágenes con diferentes geometrías. Un enfoque alternativo es el uso de información de menor resolución espacial y mayor resolución temporal como la provista por los sensores "Advanced Very High Resolution Radiometer" (AVHRR), y/o el sensor "Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer" (MODIS). Con estos datos pueden estudiarse grandes áreas (escala regional o global) con un limitado nivel de detalle.

Desde el punto de vista de la teledetección los sensores registran la radiación electromagnética reflejada por los objetos de la superficie terrestre, en las diferentes longitudes de onda, lo que permite estudiar la dinámica de la cobertura vegetal. Al presente, se han desarrollado numerosos índices que han sido usados para estudiar diferentes aspectos de la vegetación y su dinámica (Huete et al., 1999; Zarco-Tejada et al., 2003; Ferreira et al., 2003; Huang et al., 2007; Glenn et al., 2008; Baldi et al., 2008; Zang et al., 2009:).

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:

$$NDVI = \frac{Banda\ 4(TM) - Banda\ 3(TM)}{Banda\ 4(TM) + Banda\ 3(TM)} \quad \text{Ec. 3-1}$$

Este índice ha sido utilizado en varios estudios de la dinámica vegetal en diferentes condiciones ambientales (Weiss et al., 2004; Barbosa et al., 2006; Baldi et al., 2008; Breunig et al., 2011) por involucrar información electromagnética correspondiente al rojo e infrarrojo cercano, que está disponible en casi todas las misiones satelitales. Las series de imágenes de NDVI son las más antiguas o largas en comparación con otros indicadores. En la actualidad hay más de 40 años de registros de este índice con una resolución espacial moderada (Azzali y Menenti, 2000). Estas ventajas hacen que el NDVI sea el más adecuado para estudiar los procesos de cambio del uso del suelo en periodos largos. En esta tesis se utilizan dos fuentes de NDVI, por un lado se usan imágenes LandSat puntuales y por otro se utiliza un producto derivado de la serie FASIR.

### 3.4.1 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 Earth Explorer o el Global Visualization Viewer (GloVis) vía web. La Tabla 3-5 presenta las características de los diferentes sensores que conforman la serie de satélites LandSat.

Tabla 3-5: Especificaciones técnicas de los sensores Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM) y Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) a bordo de diferentes satélites LandSat. Fuente: Chander et al. (2009).

GRUPO	SATELITE	Años	SENSOR	RESOLUCION	BANDAS
1	LandSat 1 (L1) LandSat 2 (L2) LandSat 3 (L3)	1972-1978 1975-1982 1978-1983	MSS	79 m, pixel procesados 60 m,	4
2	LandSat 4 (L4) LandSat 5 (L5)	1982-2001 1984-actual	TM y MSS	30 m para las 6 bandas reflectivas y 120 m para la banda térmica	7
3	LandSat 6 (L6) LandSat 7 (L7)	1993-no orbito 1999-actual	(L6) ETM (L7) ETM+	30 m para las 6 bandas reflectivas y 60 m para la termal	7

La segunda generación (Grupo 2) produjo un significativo avance en el sensoramiento remoto gracias a la incorporación de nuevos sensores y a la mejora en la adquisición, transmisión y rápido procesamiento de los datos (Chander et al., 2009). Estos satélites contaban a bordo con el sensor Thematic Mapper (TM) además del sensor MSS, que fue incluido para contar con información continua con los anteriores satélites, pero rápidamente los datos del (TM) fueron utilizados como fuente primaria de información por tener mejor resolución espacial (30 m.), resolución espectral, radiométrica y geométrica. El último grupo de satélites cuenta con los sensores Enhanced Thematic Mapper (ETM) y el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).

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 superficie 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. 3-2 y Ec. 3-3.

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{E_{\lambda 0} d^2 \cos \theta_z} \quad \text{Ec. 3-2}$$

$$L_\lambda = G_\lambda (ND - ND_{min}) + B_\lambda \quad \text{Ec. 3-3}$$

donde  $\pi$  (sr) representa la hipótesis de superficie Lambertiana,  $d$  es la distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas (UA),  $E_{\lambda 0}$  es la irradiancia solar espectral exoatmosférica ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ) y  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar, el subíndice  $\lambda$  indica el número de la banda,  $G_\lambda$  ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) y  $B_\lambda$  ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) son los coeficientes de transformación de  $ND$  a valores de radiancia (Chander et al., 2009).

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 (Song et al., 2001; Brivio et al., 2001). En la Tabla 3-6 se presentan los coeficientes necesarios para aplicar las ecuaciones para cada satélite y banda.

Tabla 3-6: Valores de Gain ( $G_{\lambda}$ ), Biase ( $B_{\lambda}$ ) e Irradiancia solar exoatmosférica media ( $E_{\lambda}$ ) para todos los sensores MSS utilizados en esta tesis Fuente: Chander et al, (2009)

Gain ( $G_{\lambda}$ )					
Banda	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5
1	1,95276	2,00787	2,00787	1,84252	2,08661
2	1,5748	1,33858	1,38583	1,25984	1,38583
3	1,38583	1,14961	1,14961	1,07874	1,12598
4	1,20472	0,997373	1	0,88189	0,944882
Biase ( $B_{\lambda}$ )					
Banda	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5
1	0	8	4	4	3
2	0	6	3	4	3
3	0	6	3	5	5
4	0	3,66667	1	4	3
Irradiancia solar exoatmosférica media( $E_{\lambda}$ )					
Banda	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5
1	1823	1829	1839	1827	1824
2	1559	1539	1555	1569	1570
3	1276	1268	1291	1260	1249
4	880,1	886,6	887,9	866,4	853,4

El listado con las imágenes utilizadas se encuentra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: 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
LM32400771980018	240	77	18-ene-80
LM32400791980018	240	79	18-ene-80
LM32400781980018	240	78	18-ene-80
LANDSAT_3_MSS_19800119_241_077	241	77	19-ene-80
LANDSAT_3_MSS_19800119_241_078	241	78	19-ene-80
LM4224078-1983-301	240	78	28-oct-83
LM5224078-1986-317	240	78	13-nov-86

### **3.4.2 Información de evapotranspiración provista por los satélites Terra y Aqua**

El sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA provee información muy valiosa del balance de energía de la superficie terrestre (Justice et al., 2002). Entre los múltiples productos ofrecidos por el grupo científico de las misiones Terra y Aqua, se encuentran las imágenes con datos de ET. En efecto, Mu et al. (2007, 2011) desarrollaron un método para determinar la ET con datos de MODIS. Este producto se validó con datos de 19 estaciones de observación del tipo eddy covarianza, instaladas por el programa AmeriFlux. Este algoritmo también se validó con resultados de modelos matemáticos. Los errores medios cuadráticos reportados para el flujo de calor latente son de aproximadamente 27-29 W/m<sup>2</sup>, con una ligera tendencia a subestimar las observaciones *in situ*, Mu et al.(2007).

El producto MOD16 Global Terrestrial Evapotranspiration Data Set de la Universidad de Montana contiene los datos de la ET y flujo de calor latente tanto real como potencial. Las imágenes tienen píxeles de 1 km<sup>2</sup> y cubren el periodo desde el año 2000 al presente.

El producto MOD16 y mayor información sobre los mismos se encuentran disponibles en forma gratuita en <http://www.ntsg.umn.edu/project/mod16>.

### **3.4.3 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, Huang et al. (2007) utilizaron imágenes Landsat para mapear la cobertura del BAAPA entre los años 1990-2000 y estimar la extensión del mismo en el año 1973. Debido a que las imágenes del primitivo sensor MSS poseen una resolución espacial y espectral diferente a las correspondientes a los sensores más modernos, no pudieron utilizar un método de comparación directa para determinar el cambio de cobertura entre los años 1973 y 2000. A fin de comparar las imágenes de los diferentes sensores, se debió sacrificar la mejor resolución brindada por los sensores modernos. 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.

Las imágenes de 1990 y 2000 fueron agrupadas y analizadas de a par usando un método de clustering supervisado para producir el mapa de cambios de la cobertura boscosa. El método consiste de dos procesos, una clasificación no supervisada (ISODATA) y una clasificación supervisada. Esta clasificación supervisada la realizaron con la ayuda de expertos locales los cuales definieron los pixeles de cada región de interés para cada cobertura. 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).

La Universidad de Maryland–USA también obtuvo mapas con la cobertura boscosa en el área de estudio. Esta universidad condujo una investigación a nivel mundial con el objetivo de conocer el cambio global de los bosques. Esto se llevó a cabo teniendo en cuenta la importancia de los servicios ambientales que ofrecen los ecosistemas boscosos, incluyendo la riqueza de la biodiversidad, la regulación del clima, el almacenamiento de carbono, y los suministros de agua. Uno de los productos de dicha iniciativa es la cobertura de bosques para el año 2000, la cual está definida como aquella vegetación con 5 m. o más de altura (Hansen et al., 2013). Los datos se distribuyen con una resolución de 1 arcosegundo (aproximadamente 30 metros en el Ecuador) y contiene el porcentaje de dicha cobertura en el pixel (expresada en el rango de 0-100). Estos mapas se encuentran disponibles en [http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download\\_v1.1.html](http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.1.html) (de ahora en adelante se la mencionará como Global Forest 2000).

Otro producto disponible es el de la iniciativa Lechusa (Land Ecosystem Change Utility for South América). Baldi et al. (2008) utilizaron información del sensor AVHRR para identificar y comprender los cambios funcionales de los ecosistemas de Sudamérica durante los últimos

25 años. Estos sensores dieron origen a diferentes series de datos con distinto grado de procesamiento. A modo de ejemplo se mencionan las series Pathfinder AVHRR Land (PAL) (James y Kalluri, 1994; Sellers, 1994; Ouaidrari et al., 2003); el modelado del inventario global y estudios de mapeo (GIMMS por sus siglas en inglés) (Los et al., 1994; Los et al., 2000; Tucker et al., 2004). y la serie FASIR (Los et al., 2000).

Los autores analizaron las series de NDVI disponibles, de las cuales las series PAL y FASIR (Fourier-Adjustment, Solar zenith angle corrected, Interpolated Reconstructed) presentaron los resultados más convincentes en términos cualitativos para Sudamérica.

La caracterización de los cambios funcionales de los ecosistemas Sudamericanos se basó en el análisis temporal de la media anual, el máximo anual, el mínimo anual y el coeficiente de variación (CV) anual del NDVI. El CV se calcula como  $CV = \text{desvío medio anual} / \text{media anual}$ .

Los resultados y mapas de Baldi et al. (2008) están disponibles en la página web de la Iniciativa Lechusa ([www.lechusa.unsl.edu.ar](http://www.lechusa.unsl.edu.ar)).

De la Iniciativa Lechusa, además se obtiene una serie de NDVI FASIR a escala mensual. La serie FASIR, contiene valores de NDVI cada 10 días con una resolución espacial de 8 km. La serie se encuentra disponible para el período 1982/1999. Los datos satelitales son previamente ajustados por Fourier y corregidos por el ángulo cenital solar (Los et al., 2000). Esta serie se encuentra corregida por las variaciones en el sensor, por absorción de aerosoles volcánicos, por contaminación por nubes, vapor de agua, variaciones en el ángulo solar, etc.

## Capítulo 4: Determinación de cambios de uso de suelo en la CARP y el BAAPA

La CARP, aguas arriba de la ciudad de Posadas, evidenciaba en el año 1988 una intensa actividad antropogénica (Braga et al., 2003; Leite et al., 2012). Huang et al., (2007) encontraron que para el año 1973 en la Región Oriental del Paraguay, el área cubierta por el BAAPA representaba el 73,4% de la superficie original, reduciéndose rápidamente al 40,7% para 1989, y hasta alcanzar el 24,9% en el año 1999. Por su parte, Baldi et al. (2008) determinaron tendencias positivas y negativas de los cambios funcionales en Sudamérica para el periodo 1982-1999. En la Fig. 4-1 se muestran los mapas con las tendencias de la media anual y el mínimo del NDVI para la CARP. En ambos mapas se distinguen tendencias negativas en el oeste de la cuenca siendo más notorio las de la media anual del NDVI. Los autores destacan el contraste existente en los tres países, donde Paraguay presenta los mayores cambios significativos en el uso de suelo para dicho periodo.

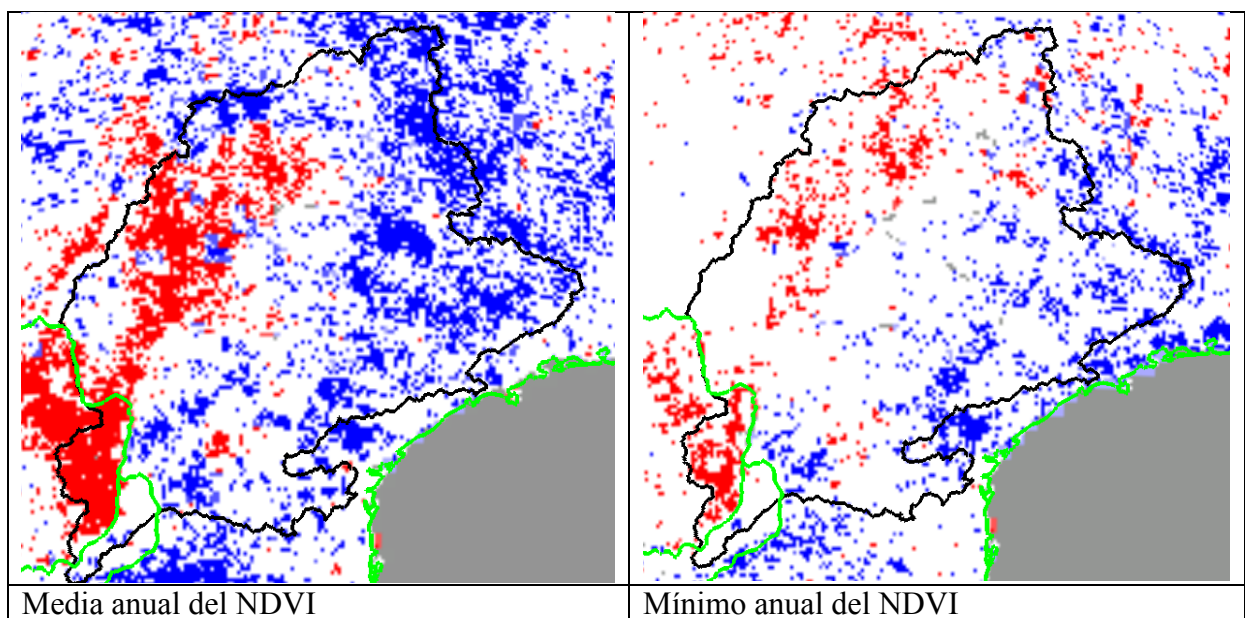


Fig. 4-1: Tendencias de la media anual y el mínimo NDVI (FASIR) en la CARP (línea negra) para el periodo 1982-1999. En rojo las tendencias negativas y en azul las positivas. La línea verde corresponde a límites internacionales Fuente (Baldi et al., 2008).



Leite et al. (2012) investigando las emisiones de carbono en Brasil encontraron que el bioma que sufrió los mayores cambios en el periodo 1945-1990 fue el del BA con una sustitución del 42% de su cobertura original, seguido del Cerrado con un 23% de su cobertura, ambos biomas pertenecientes a la CARP.

Para determinar el cambio de uso de suelo dentro del BAAPA, se consideran 2 tipos de usos, Bosque y No Bosque, ya que no es de interés en este trabajo la clasificación del tipo de vegetación que cubre las áreas desforestadas. Para esto se utiliza el índice NDVI, que permite determinar el nivel de actividad fotosintética en un pixel.

La serie NDVI FASIR cedida por la Iniciativa Lechusa, contiene datos mensuales para el periodo 1982-1999, con los que se determina la distribución anual característica del NDVI en el área de estudio y la variación temporal del NDVI en el periodo 1982-1999. En base a estas distribuciones, se determinan los cambios de uso del suelo para diferentes años o periodos. Para determinar los porcentajes de bosque y no bosque en cada cuenca se calcula la media aritmética de los píxeles correspondientes al área definida por la cuenca.

En aquellas áreas donde con los datos de la serie FASIR se observan cambios en el uso de suelo, se realiza un análisis más detallado mediante imágenes LandSat (sensores MSS) de final de la década del 70 e inicios de la del 80. Para esto, se realiza una clasificación utilizando 4 bandas del sensor MSS y otra banda conteniendo los datos de NDVI. Cabe destacar que Zhang et al. (2009), utilizan la misma clasificación junto a 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. En este caso, no se contaba con un DEM confiable que pueda superponerse con los píxeles de las imágenes del sensor MSS para todas las cuencas, por lo que no se lo utilizó en la clasificación. Se optó por calcular la reflectividad en base a las ecuaciones Ec. 3-2 y Ec. 3-3, para posteriormente determinar el NDVI con Ec. 3-1. Por último se realiza la clasificación no supervisada ISODATA (Zhang et al., 2009) con las 4 bandas del

sensor MSS y el NDVI. Esta clasificación se aplica a cada escena utilizada para luego determinar el porcentaje del cambio de uso del suelo en cada cuenca o área de interés.

Para el análisis de los usos de suelo en el año 1990 y 2000 se utilizan los productos de GLCF 2006 y Global Forest 2000, extrayendo los porcentajes de cobertura boscosa en cada una de las áreas de interés en cada año.

La ET mensual en las cuencas estudiadas para el periodo 2000-2010, se extrae de las imágenes del producto MOD16 Global Terrestrial Evapotranspiration.

Para determinar los cambios de uso de suelo en las diferentes cuencas se selecciona el tipo de imagen según a) la dimensión del área o cuenca a analizar, b) el tamaño del pixel es decir la resolución de la imagen, y c) la disponibilidad de imágenes para cada uno de los diferentes sensores y satélites teniendo en cuenta el año. El procesamiento de la información satelital se realizó con los softwares ENVI y ArcGis, de los cuales se cuenta con licencia.

## **4.1 Resultados de la determinación de cambios en el uso de suelo**

### **4.1.1 Análisis de datos FASIR**

Se utilizan los datos de la serie FASIR presentados por Baldi et al. (2008) y cedidos por la Iniciativa Lechusa. Se elaboran diferentes mapas de NDVI de la CARP de manera a contar con aquellos que presenten con más claridad las áreas con bosque y sin ellos. Primeramente se determina la media mensual para toda la cuenca y todo el periodo (1982-1999), y con ello se determina el ciclo anual medio, de manera a examinar la estacionalidad del NDVI. En la Fig. 4-2 se observa que septiembre es el mes de menor NDVI en la CARP mientras que abril presenta el mayor NDVI con valores muy similares en los meses de marzo y mayo. Según Peixoto et al. (2000) la siembra de soja en el Brasil se realiza en los meses de octubre a diciembre, es decir que gran parte de dichos terrenos estarán con el suelo desnudo en los meses de setiembre a noviembre. Similar cultura de siembra se tiene en Paraguay (MAG-DGP, 2010). Teniendo en cuenta esto, los valores de NDVI del mes de setiembre se utilizan

para determinar las áreas de bosque y no bosque en la cuenca ya que las áreas destinadas para cultivos anuales presentarían valores de NDVI bajos.

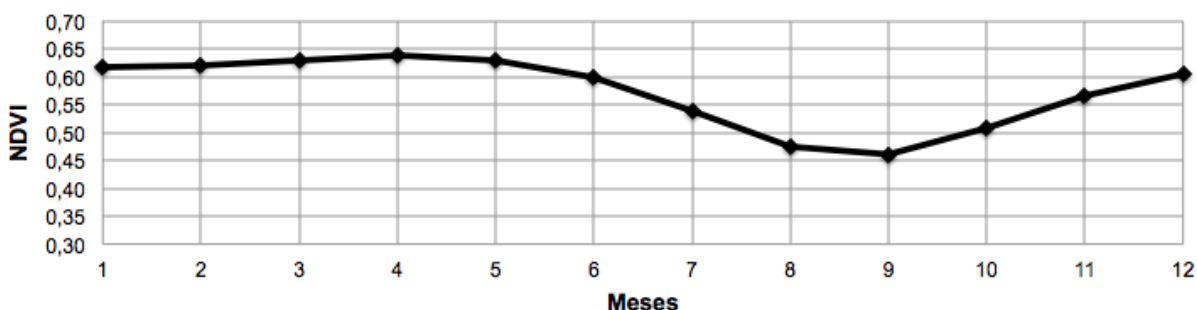


Fig. 4-2: Ciclo anual medio de NDVI en la CARP para el periodo 1982-1999.

Se confeccionan mapas de NDVI para el mes de septiembre de los años 1982 y 1999 para analizar los cambios que se observan en las áreas boscosas. Para establecer, el rango de valores de NDVI que representan el bosque, se determina el valor mínimo del BAAPA para dicho mes del año. Para esto se utilizan las zonas de los parques nacionales de las Cataratas de Iguazú en Brasil y Argentina, ya que estos bosques están protegidos y por lo tanto aún hoy permanecen de forma natural. Del análisis del NDVI en el Parque Iguazú se obtiene que el valor mínimo que representa el bosque en el mes de setiembre para todo el periodo es de 0,65. Se elaboran mapas de la cobertura boscosa para los años 1982 y 1999 en los cuales las áreas con valores de NDVI superior a 0,65 son consideradas bosques.

En la Fig. 4-3(a) se observa que para el año 1982 la Argentina aun se encontraba cubierta por bosques, en Paraguay ya se observan áreas deforestadas y en Brasil la mayoría de los bosques nativos ya habían desaparecido. Las áreas pertenecientes a Argentina y Paraguay se encuentran dentro de la subcuenca P4 y las de Brasil dentro de la subcuenca P3 BAAPA citadas como subcuencas de estudio. Para el año 1999 en la Fig. 4-3 (b) se aprecia (cualitativamente) que en Paraguay disminuyó el área del BAAPA, esto concuerda con lo publicado por Huang et al. (2007).

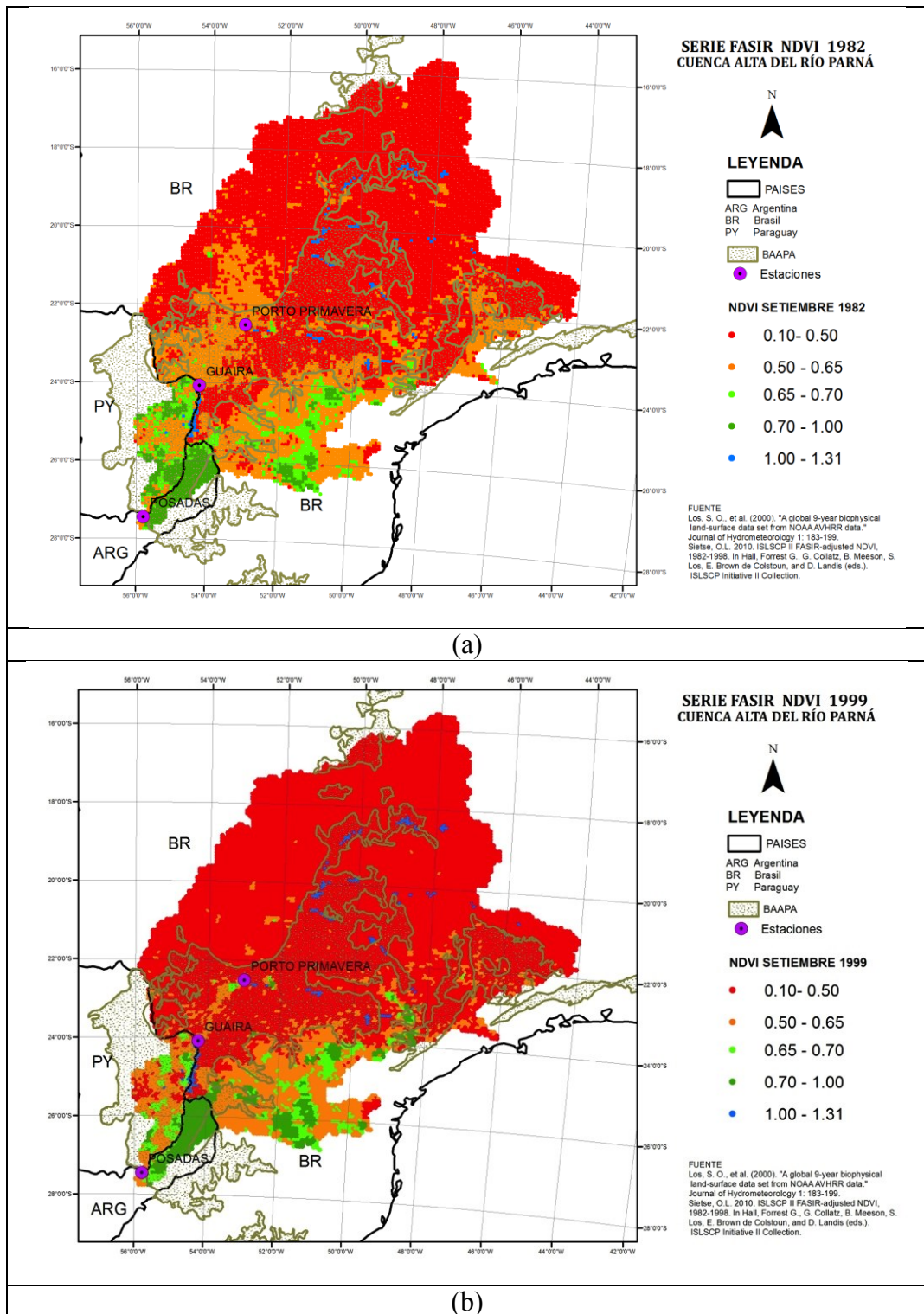


Fig. 4-3: Mapas de NDVI del mes de septiembre para (a) 1982 y (b) 1999 en la CARP. Gama de colores rojo representa no bosque, gama de colores verdes representa bosque y el azul agua.

El Parque Iguazú es adoptado como el área boscosa testigo, que ofrece la oportunidad de caracterizar el comportamiento del BAAPA durante el periodo estudiado. Así, se determinan las variaciones anuales del NDVI para el parque, el cual varía entre 0,77 y 0,82 para el

periodo 1982-1999, encontrándose el mayor valor en el año 1984, según se observa en la Fig. 4-4.

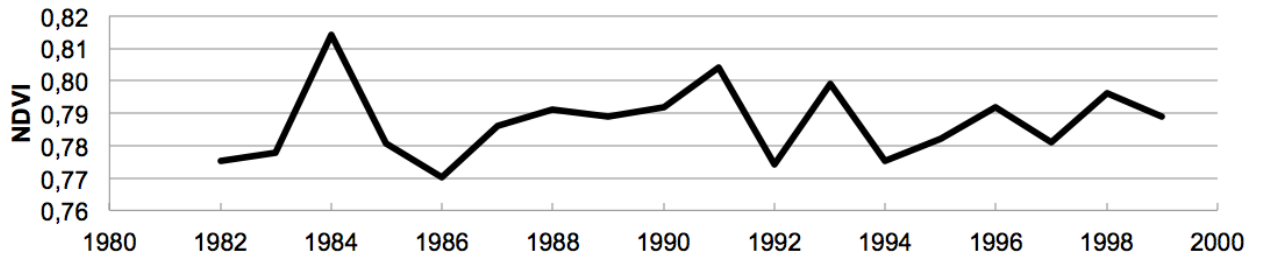


Fig. 4-4: NDVI anual del Parque Iguazú (Argentina y Brasil).

Como se citó anteriormente la subcuenca P4 Oeste se encuentra principalmente dentro del BAAPA (Fig. 4-5) además teniendo en cuenta la heterogeneidad de los cambios de uso de suelo encontrado en los 3 países, se determinan las series de las medias anuales de NDVI para cada uno de ellos y se compara con la serie de valores del NDVI del Parque Iguazú.

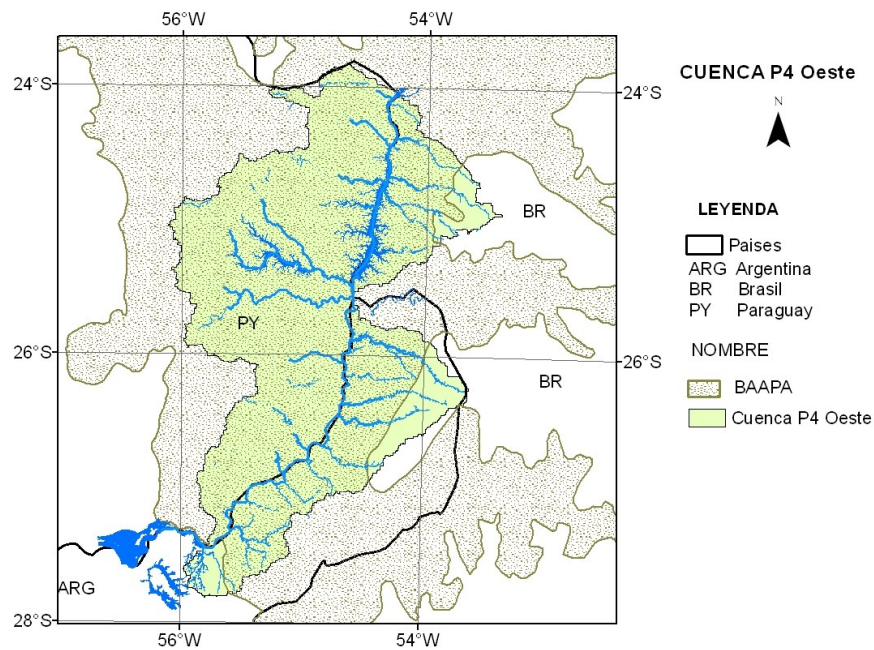


Fig. 4-5: Cuenca P4 Oeste, con límites del BAAPA (Di Bitetti et al., 2003) y de los países.

Se observa en la Fig. 4-6, que las cuencas argentinas presentan valores y comportamiento anual similar a los del Parque Iguazú, las cuencas brasileras presentan valores de NDVI medio en el orden de 0,6 y en las cuencas paraguayas el NDVI varía entre 0,75 a 0,68 en los últimos años, con una tendencia negativa.

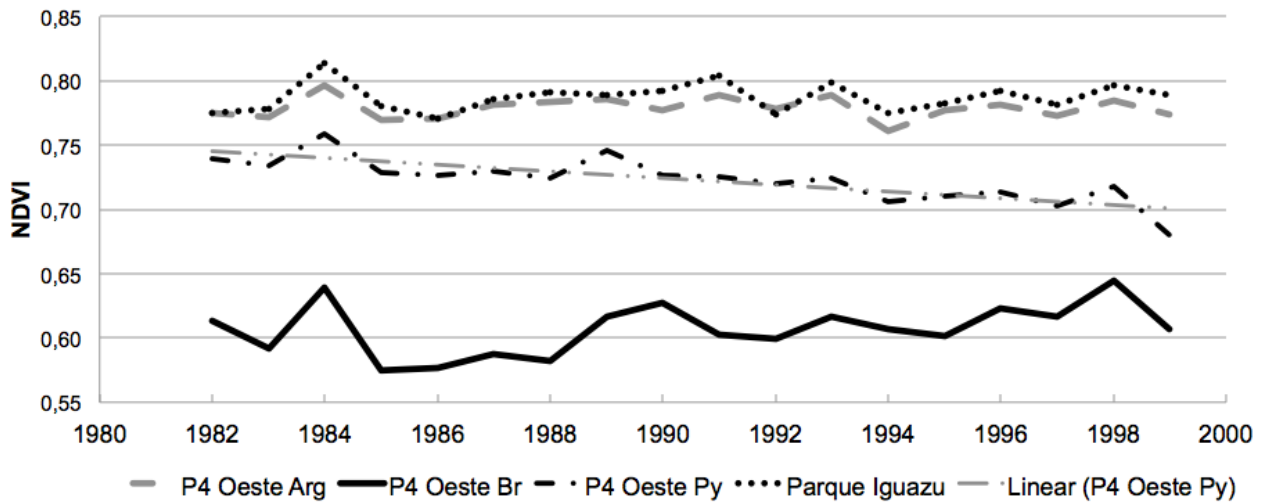


Fig. 4-6: NDVI medio anual en diferentes áreas de la cuenca P4 Oeste.

Este análisis confirma que hay una disminución de los valores de NDVI en la porción paraguaya de la subcuenca P4 Oeste durante el periodo 1982-1999, sugiriendo que existe un cambio en el uso de suelo del BAAPA. En contraste, en la porción Argentina los valores indican que la zona sigue cubierta por el BAAPA. Los datos de FASIR muestran que Brasil no contaba ya con cobertura del BAAPA en la mayor parte de la CARP, incluyendo a la subcuenca P3, en el periodo 1982-1999.

Estos resultados concuerdan con los encontrados por Tucci y Clarke (1998), García (2000) y Schnepf et al.(2001), Di Bitetti et al. (2003), Braga et al. (2003), Huang et al. (2007), y Baldi et al. (2008).

#### 4.1.2 Análisis de datos Landsat

El análisis presentado arriba muestra que durante 1982-1999 se produjo un cambio importante del uso del suelo en la subcuenca P4 Oeste del sector de Paraguay. Sin embargo el nivel de resolución espacial no es suficiente para analizar los detalles de la deforestación en las cuencas de la subcuenca P4 Oeste. Por esto se analizan en detalle estos cambios con imágenes LandSat, cuya resolución espacial (30 m.) es la sugerida por Woodcock et al. (2002) para este tipo de estudios. En síntesis la metodología consiste en realizar una clasificación con el método ISODATA de 4 bandas y la imagen de NDVI, como se explicó anteriormente (Zhang



et al., 2009). 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). Esta clasificación (ISODATA) se realiza para cada escena utilizada (5 escenas de imágenes tomadas en el año 1980 con el satélite L3).

Posteriormente se calculan los porcentajes de cada tipo de uso con la imagen clasificada, donde se determina que la Cuenca P4 Oeste posee 64% de cobertura boscosa en el año 1980, del cual, el 64% se encuentra en Paraguay, el 31% en Argentina y el 5% en Brasil (Fig. 4-7).

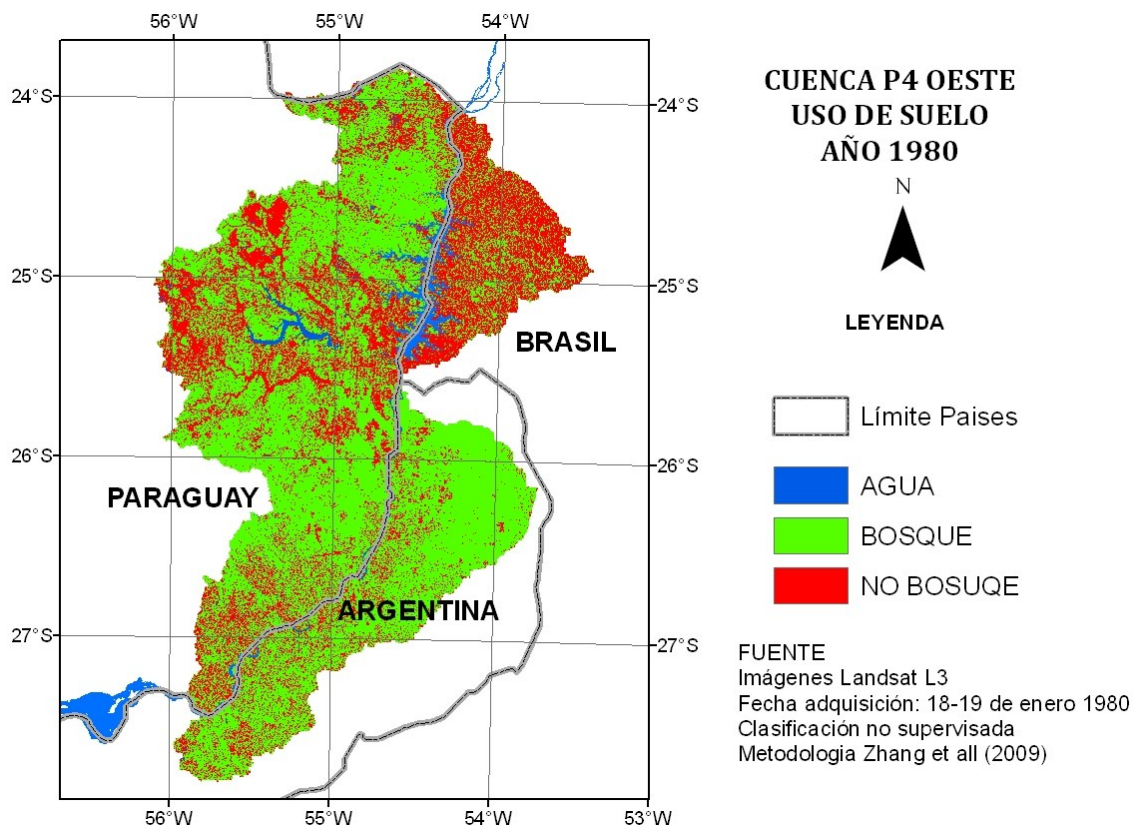


Fig. 4-7: Uso de Suelo Subcuenca Residual P4 para el año 1980.

Estos porcentajes calculados para cada país, implican que el 66% de la porción paraguaya de la subcuenca P4 Oeste estaba cubierta por el BAAPA en 1980, mientras que solo el 22% de la porción brasilera tenía bosques. En contraste el 80% de la porción argentina de la subcuenca P4 Oeste era boscosa. En otras palabras, para el año 1980 se observa una disminución importante de la cobertura del BAAPA en el Brasil que no se observa ni en Paraguay ni en

Argentina. La Fig. 4-8 resume los porcentajes de agua, bosques y no bosques en la cuenca Oeste P4 y en las cuencas de cada país.

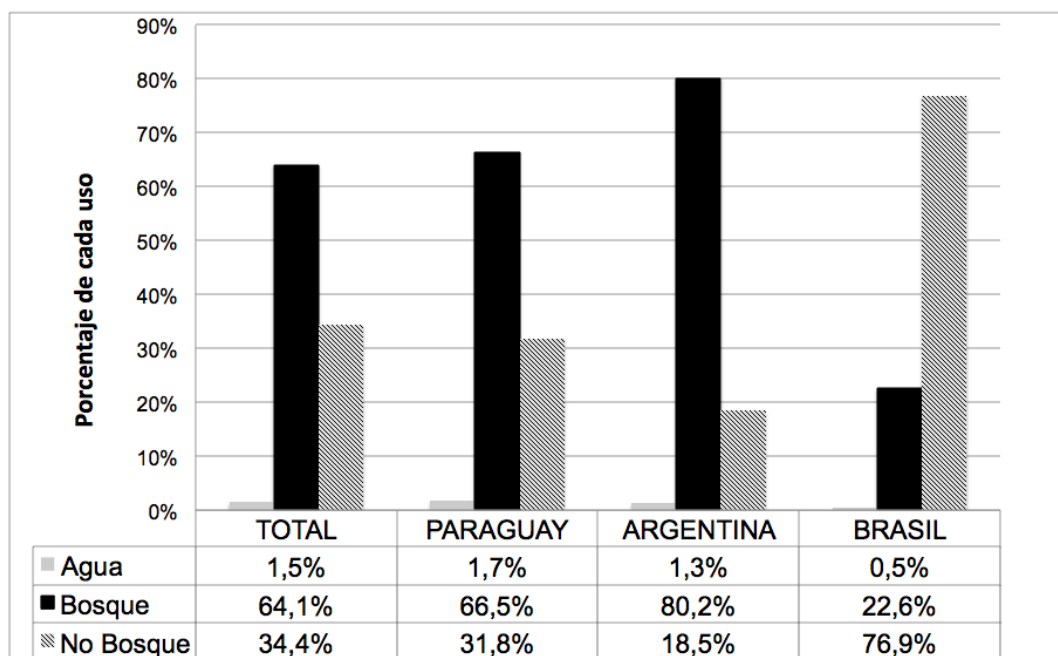


Fig. 4-8: Porcentajes de usos de suelo en la Subcuenca P4 Oeste y en cada país para el año 1980. En cada columna el total corresponde al 100% de cada área.

Para poder analizar la dinámica de los porcentajes descriptos, se realiza un análisis similar para la información disponible en el año 2000.

Se utilizan los datos de Global Forest 2000 (Hansen et al., 2013) para obtener las áreas con bosques y áreas sin bosques en la subcuenca P4 Oeste. Para esto se utiliza el siguiente criterio de clasificación: las celdas con 75% o más de vegetación con más de 5 m., se lo clasifica como áreas cubiertas con bosques y las celdas con valores de 25% o menos, como áreas sin bosques. Así se confecciona un mapa para el año 2000 (ver Fig. 4-9) donde el color verde representa las áreas boscosas y el rojo las zonas sin bosque. Cabe resaltar que solo el 10% de los pixeles están en el rango de 25-75 es decir que la mayoría de las celdas estaban en el rango 0-25% o 75-100%.



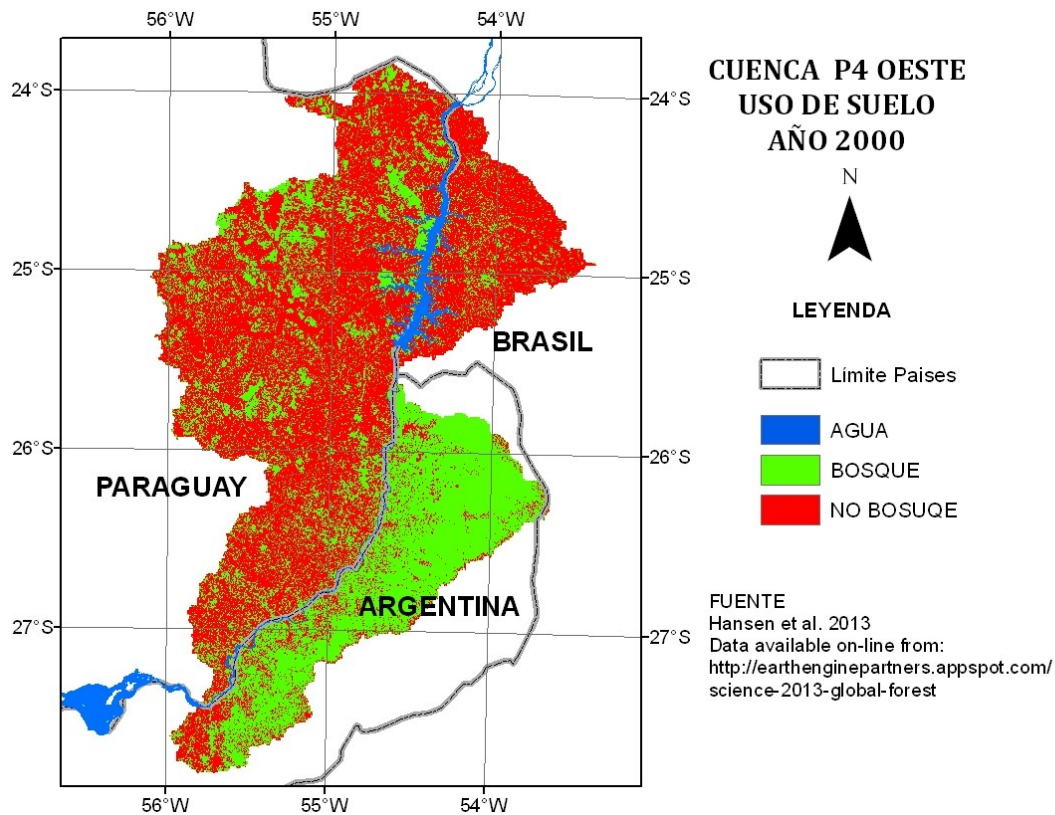


Fig. 4-9: Uso de suelo en la subcuenca P4 Oeste para el año 2000.

En la Fig. 4-9 se observa que para el año 2000 la cobertura boscosa en la cuenca P4 Oeste disminuyó a 37%. Del total de la cobertura boscosa el 41% se encuentra en el Paraguay, el 54% en la Argentina y el 5% en el Brasil. Nuevamente, para las cuencas de los países se tiene que la cobertura boscosa en Paraguay ocupa el 25%, en Argentina el 75% y en Brasil el 13% de sus territorios dentro de la cuenca. En la Tabla 4-1 se observan los porcentajes y la pérdida de bosque para toda la subcuenca P4 Oeste y en las cuencas de cada país en el periodo 1980-2000.

Tabla 4-1: Cobertura de Bosque y su variación, en las cuencas de cada país y en la subcuenca P4 Oeste para el periodo 1980-2000.

	1980	2000	Variación 1980-2000
Argentina	80%	75%	-5%
Brasil	22%	13%	-9%
Paraguay	66%	25%	-41%
P4 Oeste	64%	34%	-30%

Es decir que en la subcuenca P4 Oeste se registran periodos con mas del 20% de la superficie deforestada, lo que según Bosch y Hewlett (1982) es suficiente para que se manifiesten cambios en Q.

Dado que el Paraguay presenta la mayor deforestación durante los 20 años, se propone a continuación analizar el periodo 1980-1990 para tener un mejor detalle de la evolución de la deforestación en Paraguay. Esto se realiza utilizando el Producto de GLCF, el cual presenta las áreas con bosque en el año 1990 y la pérdida de bosque en el periodo 1990-2000 de todo el Paraguay.

Se obtiene un mapa con la cobertura del bosque para el año 1990 en las cuencas paraguayas de la subcuenca P4 Oeste (Fig. 4-10) donde se determina que para el año 1990 la cobertura boscosa es del 39%, es decir que entre 1980 y 1990 disminuyó un 27% el BAAPA. Hasta el año 2000 disminuye otro 14%, llegando a registrar tan solo 25% de cobertura en las cuencas paraguayas de la subcuenca P4 Oeste.

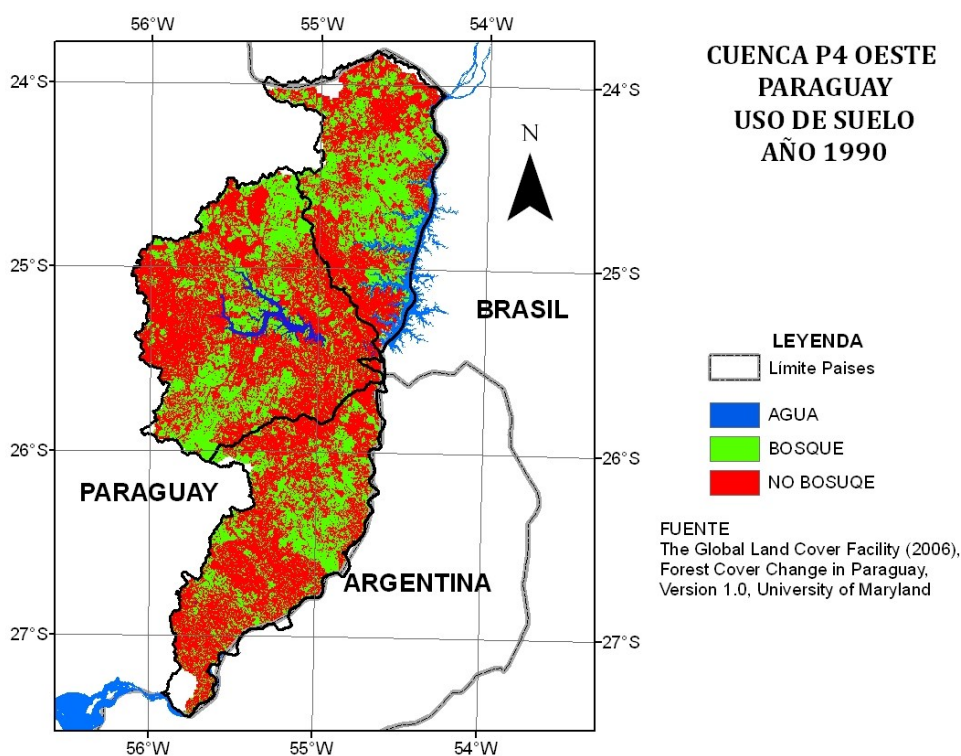


Fig. 4-10: Uso de suelo en la Cuenca P4 Oeste en Paraguay para el año 1990.

Finalmente se determina en detalle el cambio de uso de suelo en la cuenca del río Ñacunday, en la cual se cuenta con datos de Q. En esta cuenca se determina la variación del bosque utilizando nuevamente la metodología de Zhang et al. (2009) para imágenes de los años 1975,1980,1983 y 1986. Para los años 1990 y 2000 se vuelve a utilizar los datos de GLCF. Así se obtienen los cambios de uso de suelo en la cuenca del río Ñacunday. En la Fig. 4-11 se observa que en el año 1975 se tenía una cobertura del 95,8% de bosque, y a partir de dicho año empieza a registrarse una disminución del bosque 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 Fig. 4-12.

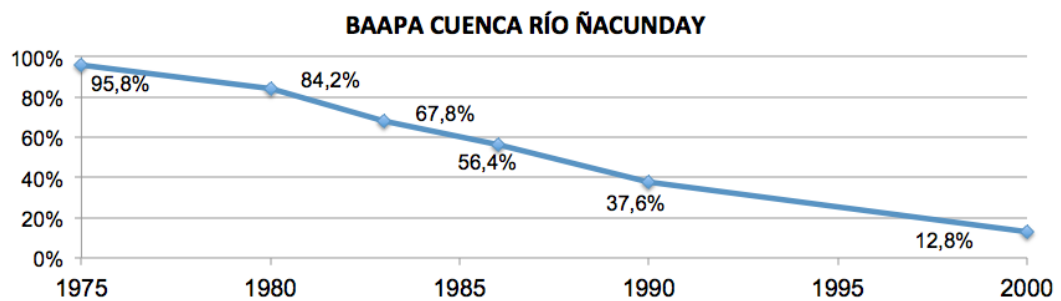


Fig. 4-11: Variación de la cobertura boscosa cuenca de Ñacunday periodo 1975-2000.

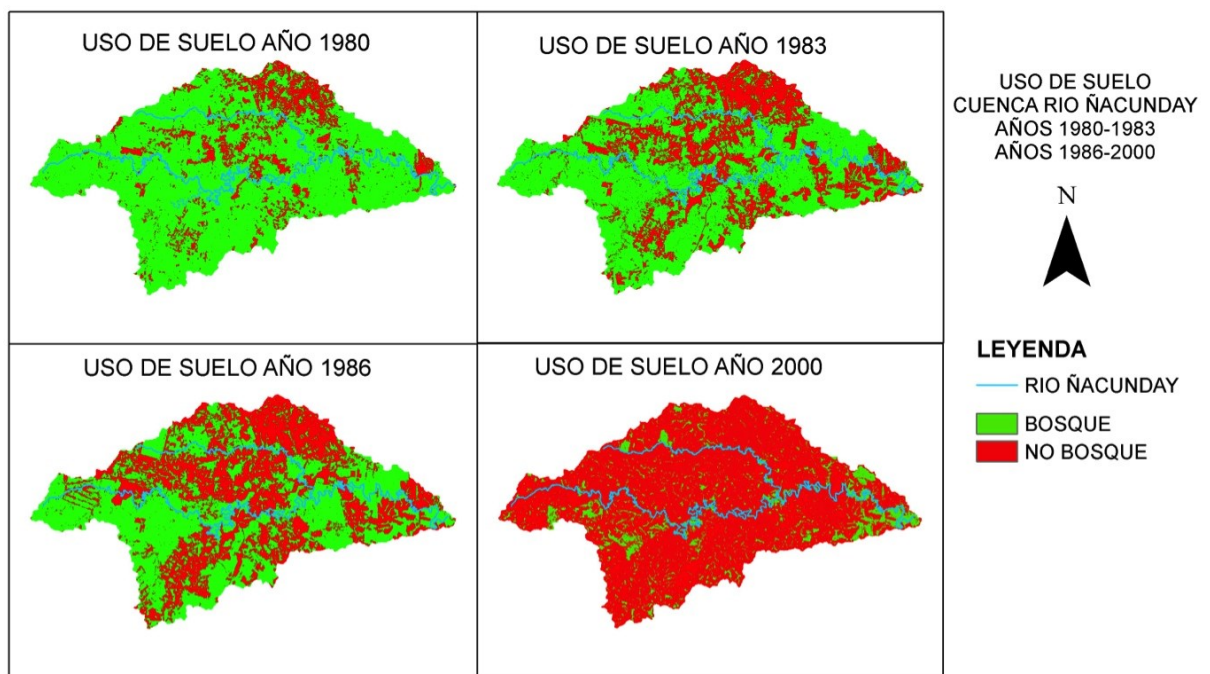


Fig. 4-12: Mapas de uso de suelo de la cuenca Ñacunday años 1980-1983-1986-2000.

### 4.1.3 Análisis de datos de evapotranspiración provisos por los satélites EOS-Terra y Aqua

La ET es la principal pérdida de agua en el balance hídrico de una cuenca superficial. La dinámica espacio temporal de esta variable depende del uso del suelo y de factores climáticos. Por lo tanto, en esta sección se pretende caracterizar la ET para áreas boscosas y áreas deforestadas durante el periodo 2000-2010, en el que se dispone de información del producto MOD16 y MYD16. Para este análisis se deben seleccionar áreas boscosas y contrastarlas con aquellas que han sido deforestadas.

Con el objetivo de obtener los valores de la ET en aquellas áreas con cobertura del BAAPA y en las áreas que han sufrido deforestación, se definen primeramente los mismos utilizando los datos de Global Forest 2000. A partir del Global Forest se determinan las áreas sin bosques y la ubicación precisa de los parques nacionales dentro de la ecorregión BAAPA en los países, estos parques poseen aun la cobertura original del BAAPA. Los parques considerados y el tamaño determinado en cada uno de ellos se presentan en la Tabla 4-2 y en la Fig. 4-13.

Tabla 4-2: Parque y reservas naturales considerados para determinar la ET del BAAPA.

Parque o Reserva	Área
Parque de las Cataratas de Iguazú	1.400 km <sup>2</sup>
Reserva del Mbaracayu	580 km <sup>2</sup>
Reserva San Rafael	200 km <sup>2</sup>

Las áreas sin bosque se seleccionaron de forma aleatoria en Paraguay y Brasil teniendo en cuenta las cantidades en cada uno de ellos considerando la relación de los porcentajes de área de cada uno de los países en la subcuenca P4 Oeste (el área en Paraguay es 3 veces mayor que el área en Brasil). Se seleccionaron 70 km<sup>2</sup> en Brasil y 230 km<sup>2</sup> en Paraguay. En la Fig. 4-13 se presentan dichas áreas.

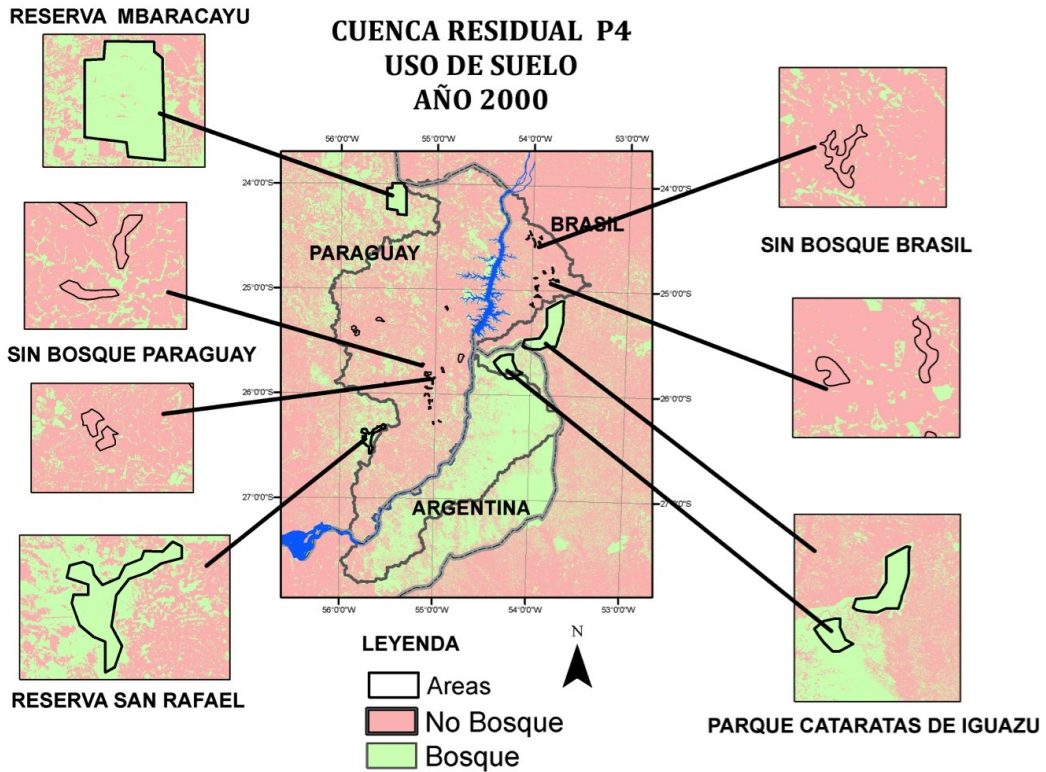


Fig. 4-13: Mapa de las áreas con cobertura boscosa y sin cobertura boscosa año 2000.

Con las áreas seleccionadas se obtiene la ET para cada mes a partir del producto ET de MOD16. Para determinar la serie de ET media en cada cuenca o área de interés, se identifican las celdas de ET que corresponden a cada cuenca o área. Con estas celdas se calcula la media aritmética de los valores de ET de cada mes y con esto se obtiene la serie de valores medios mensuales de la cuenca o del área de estudio.

Se presentan en la Fig. 4-14 los valores medios mensuales de la ET para las áreas seleccionadas. Se observa que los parques y reservas poseen una ET mayor o igual que la de las áreas desforestadas. En los meses de diciembre y enero las áreas con y sin bosque poseen una ET del orden de 150 mm. En los bosques se registran los valores mínimos en el mes de junio (invierno), aumentando a partir de agosto y permaneciendo casi constante hasta el mes de marzo cuando descienden nuevamente. En el área sin bosque, a partir del mes de octubre la ET aumenta hasta llegar a un pico en diciembre-enero y luego disminuye hasta el mes de marzo-abril (Fig. 4-14), este comportamiento podría asociarse con los cultivos de verano,

especialmente la soja que se siembra en los meses de setiembre-octubre, y se cosecha en marzo-abril (Peixoto et al.,2000). El bosque en la subcuenca P4 Oeste tiene una ET promedio de 1.360 mm anuales y el área sin bosque una ET de 845 mm anuales. Para la cuenca P4 Oeste se determina la P media del periodo 2000-2010 con los datos de CRU, siendo esta de 1.685 mm. Con el valor de P y ET medio se obtiene que la ET del bosque representa el 80% de la P, valor en el orden del 89% calculado por Pereira et al. (2010) para el BA. En las zonas sin bosques la ET representa solo el 50% de la P en ese periodo, es decir que el otro 50% de la P queda disponible en la cuenca para transformarse en Q al producirse la deforestación.

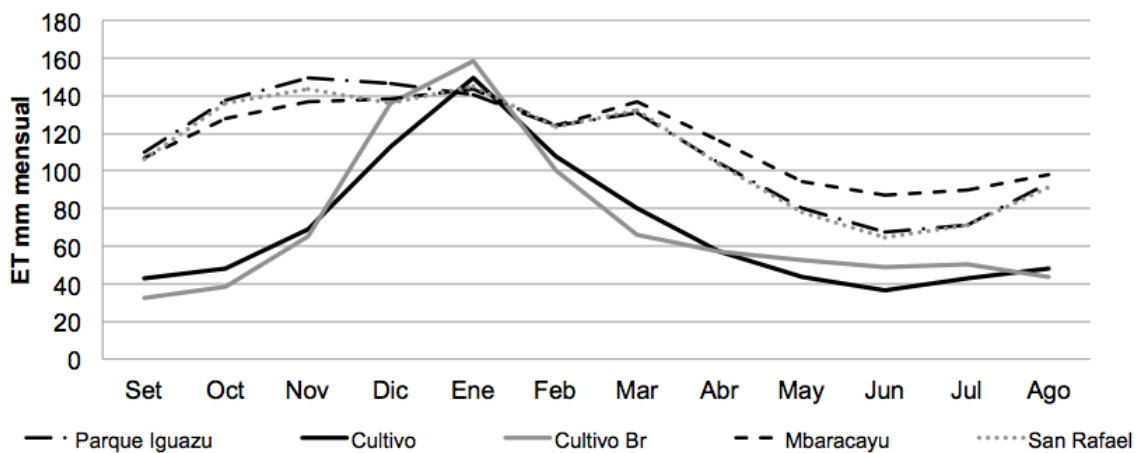


Fig. 4-14: Ciclo anual de ET (mm), áreas con bosque y sin bosque en la Cuenca P4 Oeste. Período 2000-2010

Por otra parte se determina la ET para las diferentes cuencas localizadas en los tres países, teniendo en cuenta las diferentes coberturas encontradas anteriormente para el año 2000 en cada país. Se observa en la Fig. 4-15 que en la Argentina el ciclo anual de la ET se similar al del Bosque lo cual es consistente con el 75% de cobertura boscosa registrada en el año 2000. Por otro lado las áreas en Paraguay y Brasil que para el año 2000 poseían solo una cobertura de 25% y 13%, respectivamente, tienen un ciclo anual similar a las áreas con cultivos (Fig. 4-15).



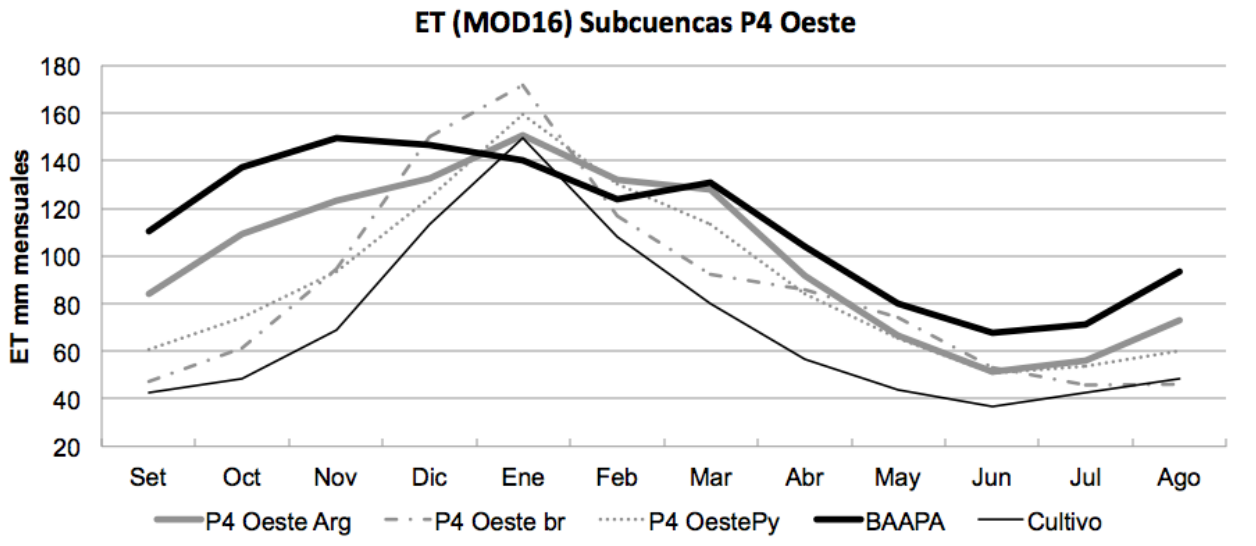


Fig. 4-15: Ciclo anual de ET en cada país de la subcuenca P4 Oeste, del BAAPA y los cultivos. Período 2000-2010

## 4.2 Resumen de los usos de suelo en la CARP y el BAAPA

El análisis del NDVI muestra que el área brasilera de la CARP, donde se encuentra la subcuenca P3 BAAPA, sufrió grandes cambios por las actividades antrópicas, principalmente por la deforestación, antes de la década de 1980. Este análisis sin embargo sugiere que para el año 1980 las áreas de Paraguay y Argentina aun contaban con el BAAPA en la mayoría de su extensión, resultados que se confirmaron con mayor nivel de detalle utilizando imágenes LandSat del año 1980. Para el periodo 1980-2000 se determina que el área del BAAPA en Paraguay disminuyó hasta llegar a un 25% de su cobertura original, la cual era del 66% en el año 1980. Por otro lado la cobertura boscosa en Argentina solo disminuyó hasta el 75% de su cobertura original.

En Paraguay se realizó un análisis más detallado de la dinámica de los cambios, donde se encontró que las mayores transformaciones se dieron en la década de 1980, disminuyendo 27% de la cobertura del BAAPA.

Para la cuenca de Ñacunday se determinó que en el año 1975 la cobertura del BAAPA era del 95% llegando a 68% para el año 1983 y finalmente solo a un 38% para el año 1990, es decir

una pérdida de cobertura boscosa de 57% en 15 años. Para el año 2000 ya solo quedaba un 13% del BAAPA en la cuenca del río Ñacunday.

En relación a los cambios de uso de suelo se concluye que los mismos ocurrieron en el Brasil antes de 1980 y en el Paraguay en las décadas de 1980 y 1990. Estos cambios en las cuencas paraguayas fueron del orden de 20% en cada década, con lo cual según Bosch y Hewlett (1982) pueden encontrarse aumentos en los Q medios. En las cuencas de Argentina no se encontraron grandes cambios en la cobertura boscosa en el período analizado.



## Capítulo 5: Análisis hidrológico de la subcuenca P3 BAAPA

Como se definió anteriormente la subcuenca P3 BAAPA está conformada por las áreas afluentes al río Paraná entre las estaciones Porto Primavera y Guaira (Fig. 5-1). Dentro de la misma se encuentra la cuenca del río Paranapanema que conforma una unidad cerrada con varias estaciones hidrométricas, esto permite el análisis a diferentes escalas espaciales en la subcuenca P3 BAAPA.

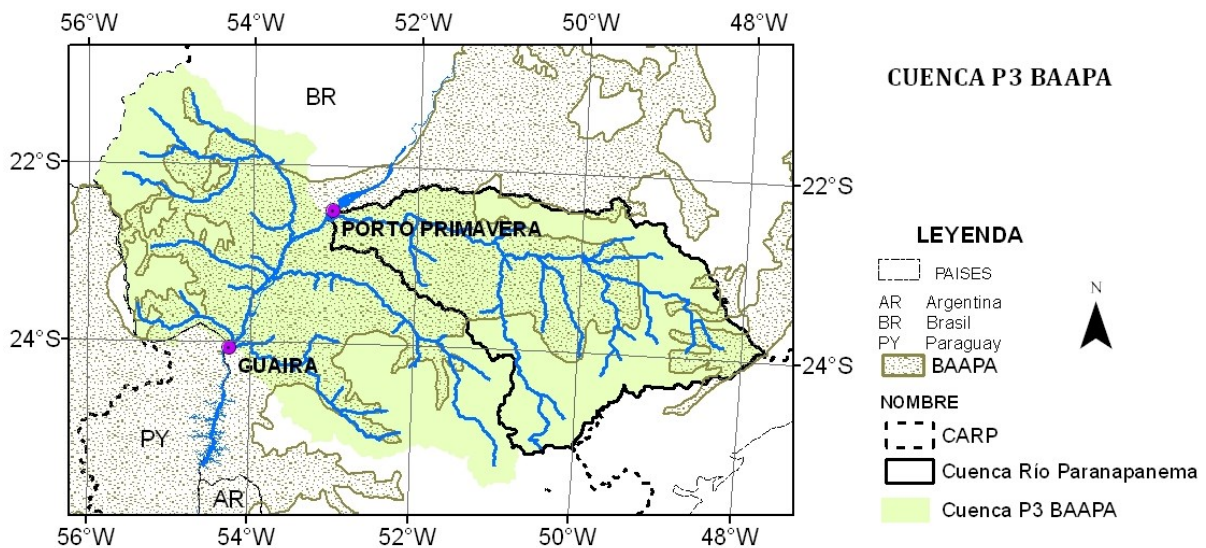


Fig. 5-1: Subcuenca P3 BAAPA y cuenca Paranapanema.

Para obtener los Q anuales que se producen en la subcuenca P3 BAAPA, se restan los Q de la estación Porto Primavera a los de la estación Guaira, y se obtiene así una serie para el periodo 1931-2009. Las series de P y T se extraen de la base de datos CRU, para el periodo 1900-2009, utilizando la metodología descrita en el capítulo 3.

En la subcuenca P3 BAAPA, para el periodo 1931-2009 el Q medio se estima en  $2.450 \text{ m}^3/\text{s}$ , que equivale a una lámina de agua de 28,5 mm mensuales (342 mm anuales), siendo la P media mensual de 123,3 mm (1480 mm anuales). La temperatura media anual resulto ser  $20,92 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los Q producidos en P3 BAAPA representan el 19% del total en Posadas.

Con el objetivo de determinar primeramente si existen tendencias significativas en las series históricas, se aplica a cada una de ellas el test de Mann-Kendall. Los valores obtenidos se

muestran en la Tabla 5-1, donde se observa que el p-zscore de todas las variables es inferior a 0,1 lo que indica que todas tienen tendencias significativas y positivas, ya que K es siempre positivo.

Tabla 5-1: Valores del Test de Mann-Kendall utilizando el Seasonal Mann-Kendall Test, para Q,P, y T de la subcuenca P3 BAAPA.

	Q (1931-2009)	P (1901-2009)	T (1901-2009)
K	1.055	807	2.544
Zscore	4,462	2,14	6,751
p zscore	0	0,0324	0

Dado que existe estadísticamente tendencia significativa en las variables, se propone un análisis más detallado de las mismas y la relación entre ellas en función del balance hídrico.

Para comparar los resultados de las variables expresadas en diferentes unidades, se trabaja con series normalizadas, la variable normalizada se obtiene con la ecuación:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta} \quad \text{Ec. 5-1}$$

siendo  $x_i$  el valor mensual de la variable en cuestión,  $\bar{x}$  la media de los valores  $x_i$  y  $\delta$  la desviación estándar de los valores  $x_i$ .  $z_i$  es el valor normalizado.

Las componentes principales de las series normalizadas se obtienen aplicando el método SSA con una ventana de 25 años. En efecto, se disponen de 78 años de datos en la serie de Q, por lo que el tercio recomendado en la metodología permite trabajar con un desplazamiento máximo de 25 años ( $V=25$ ). La misma ventana se utiliza para las demás variables. A continuación se presentan los resultados para cada una de las variables.

## 5.1 Precipitación en la subcuenca P3 BAAPA

En este caso se obtiene como resultado una componente cuyo periodo es de 9 años que explica una varianza de 21,2% y otra componente de 3,5-4 años con una varianza de 25,9%. Las oscilaciones de 9 años están moduladas, de forma que su amplitud va aumentando hasta el año 1982 para luego disminuir (Fig. 5-2-a). La componente de 3,5-4 años presenta mayores amplitudes en la década de 1970-1980 y se la relaciona en su frecuencia con el ENOS (Fig.

5-2-b). Por último la serie presenta una componente en baja frecuencia que explica una varianza de 4,7% esta componente posee una tendencia positiva desde la década de 1920 hasta mediados de la década de 1990. Se destaca que hasta 1950 aproximadamente, las P aumentaban pero se mantenían siempre por debajo de su valor medio. A partir de 1952 se supera el valor medio y continúa creciendo hasta aproximadamente 1997, cuando comienza a decaer, llegando al valor medio al final de la serie. (Fig. 5-2-c). Estas 3 componentes explican en total el 51,8% de la varianza de la serie, las demás componentes representan oscilaciones con muy bajo porcentaje de la varianza y ruido.

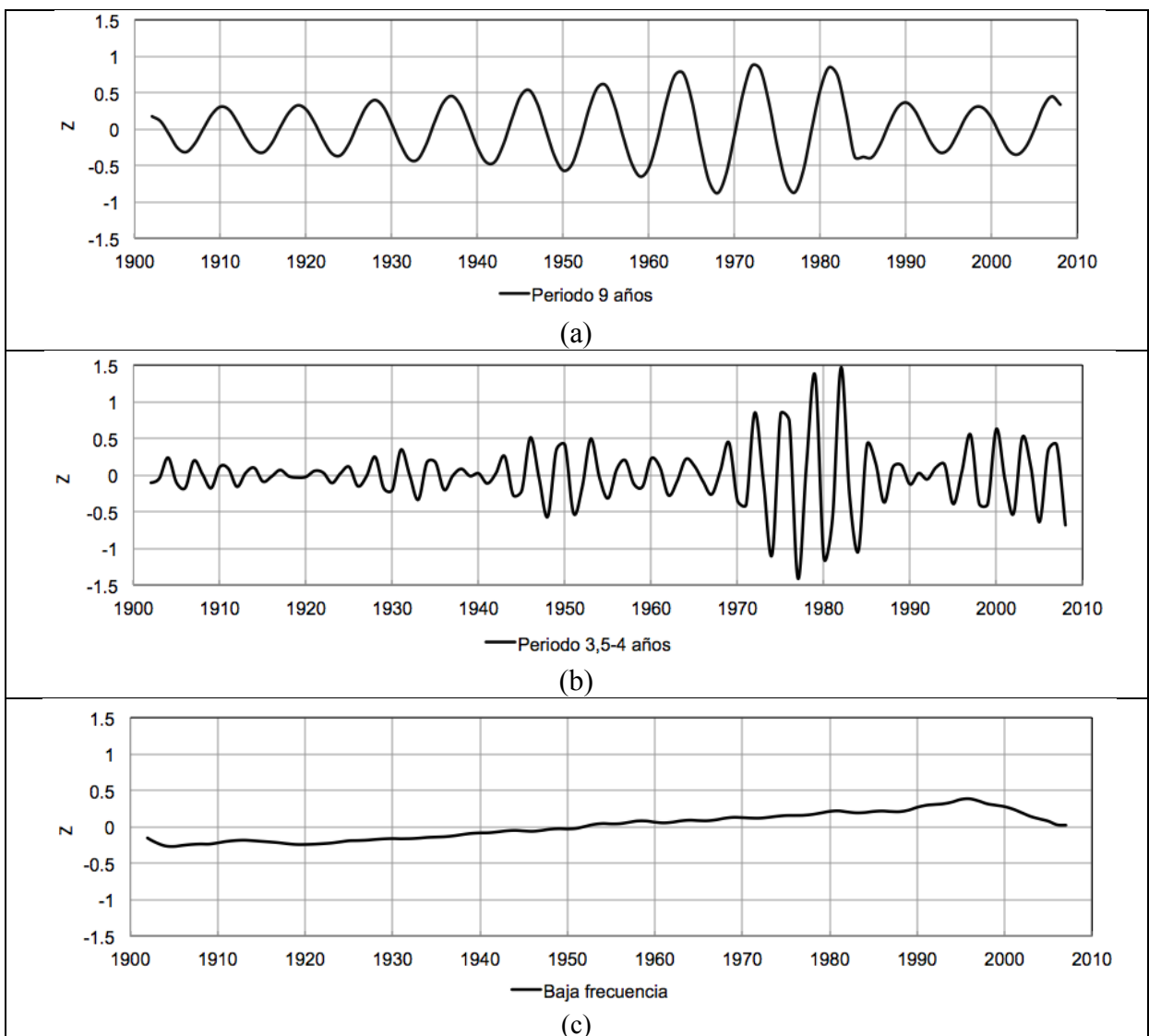


Fig. 5-2: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de P en la subcuenca P3 BAAPA. Se observa en (a) la componente con periodo de 9 años (b) la componente de 3,5-4 años y en (c) la componente en baja frecuencia.

## 5.2 Temperatura en la subcuenca P3 BAAPA

Para esta variable se observa una componente de baja frecuencia que explica una varianza de 38,7%. Esta componente se mantiene por debajo de la media decayendo hasta 1925 y luego aumenta levemente hasta 1955, año en el que comienza a aumentar su pendiente hasta superar el valor medio histórico a finales de la década de 1960 (Fig. 5-3-b). Es decir que las T comienzan a sufrir un cambio marcado a partir de 1950, llegando a duplicar el valor normalizado en el año 2010 aproximadamente. Por otra parte se obtiene una componente cuyo periodo es de 3,5-4 años modulada donde las mayores amplitudes se dan entre los años 1940 y 1960, esta componente explica el 8% de la varianza total. La otra componente posee un periodo de 2 años con una varianza de 6,9% (Fig. 5-3-a). Las 3 componentes encontradas explican el 53,6% de la variabilidad total de las T.

Es sabido que la ETP depende fuertemente de la T, tal como lo expresan las diferentes formulaciones o ecuaciones de la ETP. Es por esto que se puede inferir que la tendencia positiva de la T se reflejaría en la ETP de la subcuenca P3-BAAPA. Sumado a esto, la P hasta el año 1995 (Fig. 5-2-c) también presenta tendencia positiva, es decir mayor disponibilidad de agua en la subcuenca, con lo que existen condiciones favorables para el aumento de la ET. Estos supuestos están sustentados en los resultados de Báez (2006), quien analizó la relación entre la T, ETP y ET en diferentes estaciones meteorológicas de la CARP. Este autor concluye que las tendencias positivas en la T y P redundan en una tendencia positiva de ET. A esta situación se deben sumar los cambios de uso de suelo, que podrían además producir aumento o disminución de la ET en la subcuenca.

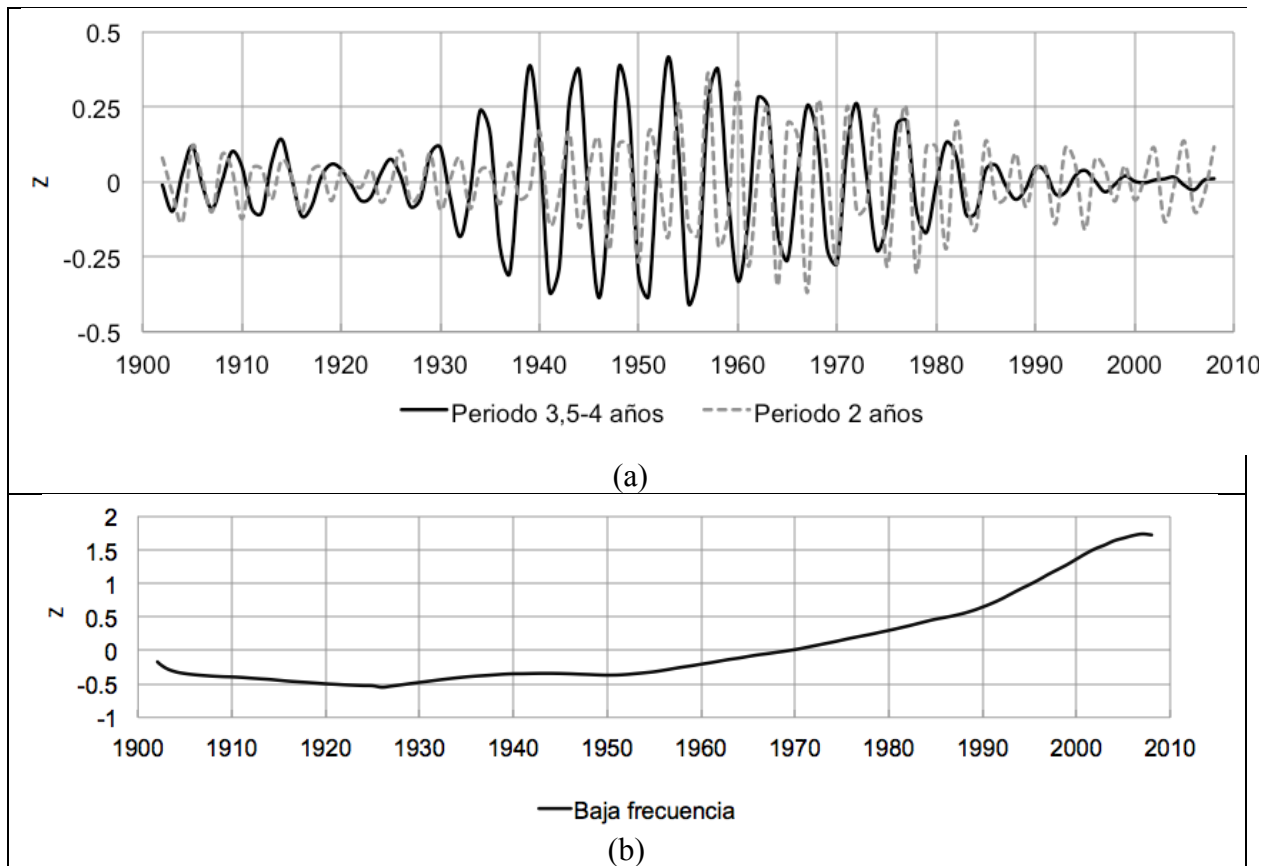


Fig. 5-3: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de T en la subcuenca P3 BAAPA. Se observa en (a) la componente con periodo de 3,5-4 años y 2 años; en (b) la componente en baja frecuencia.

### 5.3 Caudales en la subcuenca P3 BAAPA

Se analizan los datos de Q, estos sintetizan las variaciones de las P, del uso del suelo y de la geomorfología de la cuenca.

Para la serie de Q se encuentra una componente en baja frecuencia que explica el 27,7% de la varianza. La señal presenta valores mayores al valor medio histórico a partir del año 1970 (Fig. 5-4). La tendencia positiva se inicia en 1950 y llega hasta el año 1995, a partir de donde se observa un decaimiento de la señal. La otra componente presenta un periodo de 9 años y explica una varianza de 15,6% en la serie (Fig. 5-4).

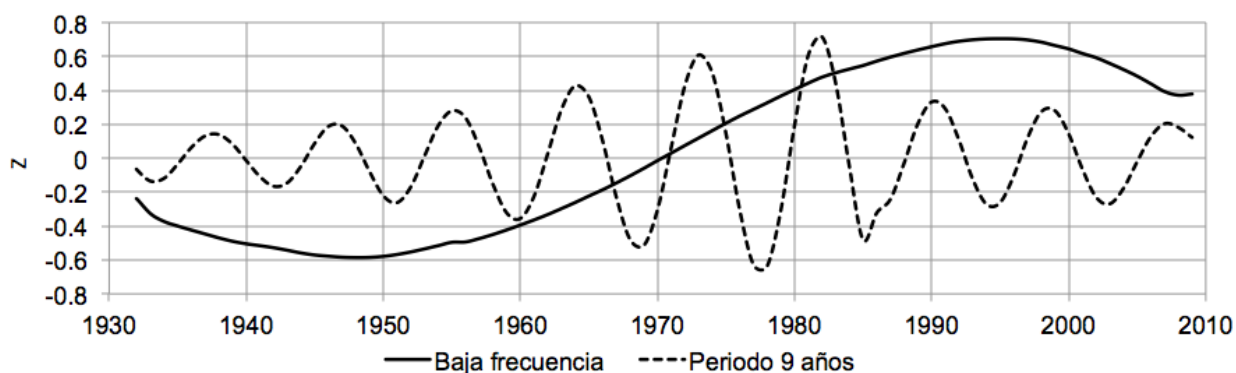


Fig. 5-4: Reconstrucción componentes principales de la serie de Q en la subcuenca P3 BAAPA. Se observa la componente con periodo de 9 años y la de baja frecuencia.

#### 5.4 Balance hídrico en la subcuenca P3 BAAPA

Considerando la ecuación del balance hídrico simplificado donde para un año hidrológico, se tiene que  $ET \approx P-Q$ , se determina la componente en baja frecuencia de la ET a partir de las componentes de baja frecuencia de Q y P. Como se mencionó anteriormente el área de estudio se encuentra situada sobre el Sistema Acuífero Guaraní, el cual no registra un incremento en su almacenamiento anual. En efecto, Vassolo (2007) determinó que, a escala anual, tanto las áreas de basalto como las de areniscas no aumentan su almacenamiento de agua, ya que las recargas son nuevamente descargadas a los ríos.

Con la componente de baja frecuencia de la ET se pretende explicar mejor la relación precipitación-uso de suelo-caudal. Como se mostró en el Capítulo 4, los cambios de bosques a cultivos, influyen principalmente en la ET, que altera la relación entre las variables hidrológicas. La ET calculada se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** donde además se muestran las P y Q utilizadas en el cálculo.

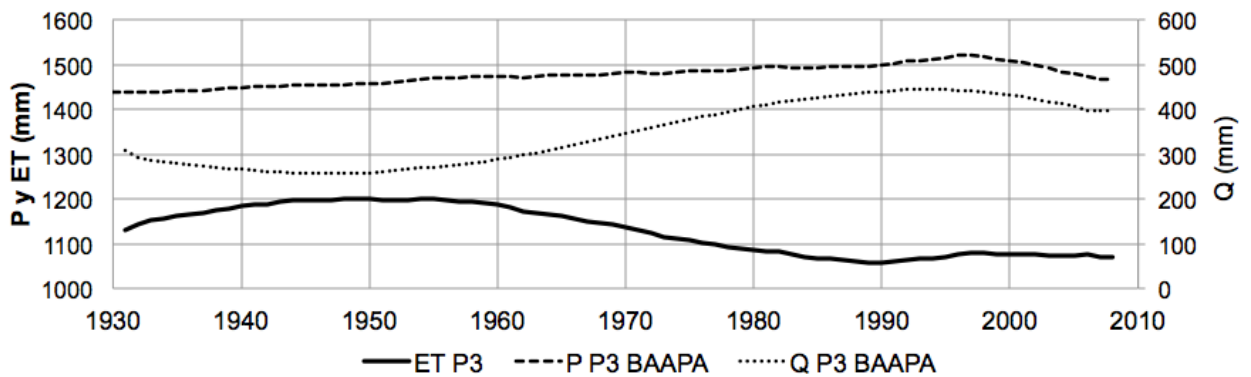


Fig. 5-5: Componentes principales de baja frecuencia de P, Q y  $ET \approx P - Q$  de la cuenca P3 BAAPA, expresados en valores medios anuales.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa que la ET aumenta hasta mediados de la década de 1950, año en el que comienza a decaer. La P en dicho periodo también aumenta, lo que junto con el aumento de la T, explica el aumento de la ET en una región prístina hasta entonces. A partir de ese año se inicia la transformación de los bosques y cultivos permanentes, en cultivos anuales los cuales tienen una menor ET media anual. Estos cambios se ven reflejados en la ET, que empieza a disminuir a pesar del aumento de la disponibilidad de agua; llegando a sus valores mínimos en el año 1990. Esta disminución en la ET impacta en los Q los que aumentaron junto al incremento de la P. Este cambio de los Q fue observado a diferentes escalas dentro de la subcuenca P3 BAAPA.

A partir de la década de 1990, la ET permanece constante hasta el final de la serie, aunque se observa una disminución de los Q asociada a la disminución de la P en dicho periodo. En el anexo 4 se presentan las componentes en baja frecuencia con los valores obtenidos a partir de los datos disponibles para cada variable.

Con todo lo expuesto se pone en evidencia que la ET tiene un comportamiento acorde con los cambios de usos de suelo ocurridos en la subcuenca P3 BAAPA, que se vieron reflejados en el aumento de Q.

Hasta el momento se ha explicado el efecto del cambio de uso del suelo en los Q pero no se ha cuantificado cuanto volumen de agua está relacionado con el aumento de la P encontrado. Para determinar el porcentaje atribuible a la P y a los otros factores que contribuyeron al

crecimiento de los Q en la subcuenca P3 BAAPA, se utiliza una metodología regresiva explicada en la metodología. En esta se analizan 2 periodos por lo que se determinó el año de corte de la serie el año 1970. Este año se seleccionó considerando que los Q fueron superiores a la media desde inicio de la década del 70. Esta separación de periodos coincide con los utilizados por Braga et al. (2003), Krepper et al. (2008), Krepper y Venturini (2009).

La recta que representa la ecuación de regresión resultante que relaciona Q y P para la subcuenca P3 BAAPA se presenta en la Fig. 5-6

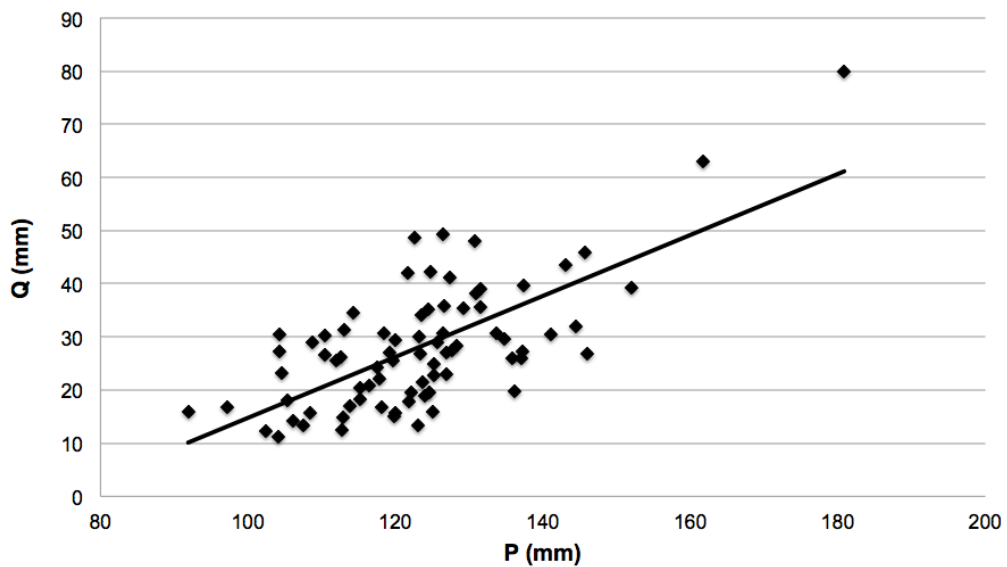


Fig. 5-6: Relación entre Q y P (media mensual) de cada año y su ajuste lineal para la cuenca P3 BAAPA

La ecuación de regresión es  $Q = 0,57 * P - 49,87$  con un  $R^2 = 0,48$ . A partir de esta ecuación y los valores de P y Q, se calculan los términos de la Ec. 2-5 considerando ambos periodos se obtiene que el aumento de Q es de 158,2 mm anuales donde 32,5 mm es atribuible a la P y 125,7 mm corresponden a otros factores. Con esto se tiene que solo el 21% del aumento de Q después de 1970 en la subcuenca P3 BAAPA es atribuible a la P.

Finalmente se determina si los cambios en los valores medios de los Q y las P, en los periodos seleccionados, son estadísticamente significativos. En la tabla 5-2 se muestran los valores obtenidos con el test t-student aplicado, donde se determina que existen diferencias significativas en las medias de los Q y no así en las de la P, ya que si el valor absoluto de  $t_{crit}$



es menor o igual al valor absoluto de  $t_{est}$  se tiene que las medias de ambos periodos presentan igualdad estadísticamente significativa.

Tabla 5-2: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias con una significancia de 95%.

	Q Subcuenca P3 BAAPA		P Subcuenca P3 BAAPA	
	1931-1969	1970-2009	1931-1969	1970-2009
Media	21,53	35,23	120,92	125,65
Varianza	39,26	163,10	126,21	273,50
Datos	39	40	39	39
Grados de libertad	57		67	
$t_{est}$	16,081		11,481	
$P(t_{crit} \leq t_{est})$ dos colas	0,00		0,14	
$t_{crit}$	2,30		2,29	

## 5.5 Análisis de los Q y las P a diferentes escalas en la subcuenca P3 BAAPA

Con el objetivo de conocer el comportamiento de los Q y P a diferentes escalas dentro de la subcuenca P3 BAAPA, se analizan estas variables en la cuenca del río Paranapanema. Las ubicación de las 3 estaciones en las que se disponen datos se detallaron en el Capítulo 3 (Fig. 3-3)

En estas estaciones se determinan las componentes en baja frecuencia de los Q y las P y se comparan con las encontradas en P3 BAAPA. En la Tabla 5-3 se observa que en todas las series de Q la primera componente es la señal de baja frecuencia explicando entre 18% y 24% de la varianza. Se observa una señal de baja frecuencia en la precipitación que explica el 7,5% de la varianza.

Tabla 5-3: Componentes de baja frecuencia obtenidos para los Q de las estaciones y P en la cuenca Paranapanema con su varianza explicada.

Variable	Varianza
Q P3 BAAPA	27,70%
Q Rosana	19,10%
Q Andira	18,50%
Q Jataizinho	24,10%

Variable	Varianza
P Paranapanema	7,50%
P P3 BAAPA	4,70%

En la Fig. 5-7: se observa que las series de baja frecuencia de Q, para diferentes escalas de cuenca, tienen un comportamiento similar en la subcuenca P3 BAAPA. Estas aumentan a partir de 1950 y llegan al pico a inicios de la década de 1980 en las estaciones de Rosana y Andira, estabilizándose hasta 1992 donde empieza a descender levemente. Por otro lado los Q en Jataizinho continúan aumentando hasta inicios del 2000 donde posteriormente se estabilizan. En todos los casos a partir del año 1970 los Q superan el valor medio de Q para todo el periodo.

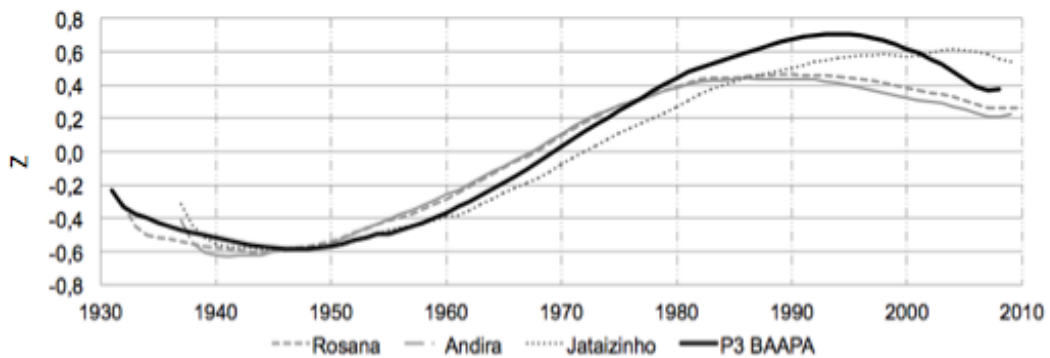


Fig. 5-7: Componentes principales de baja frecuencia determinadas para los Q en las estaciones de la cuenca del río Paranapanema y la subcuenca P3 BAAPA.

Al igual que en la P3 BAAPA, la P presenta una componente en baja frecuencia con una tendencia positiva. Desde la década de 1920 hasta el año 1960 se observa una mayor pendiente, posteriormente los valores se estabilizan aproximadamente hasta finales de 1995, a partir de donde se observa un decaimiento de la señal.

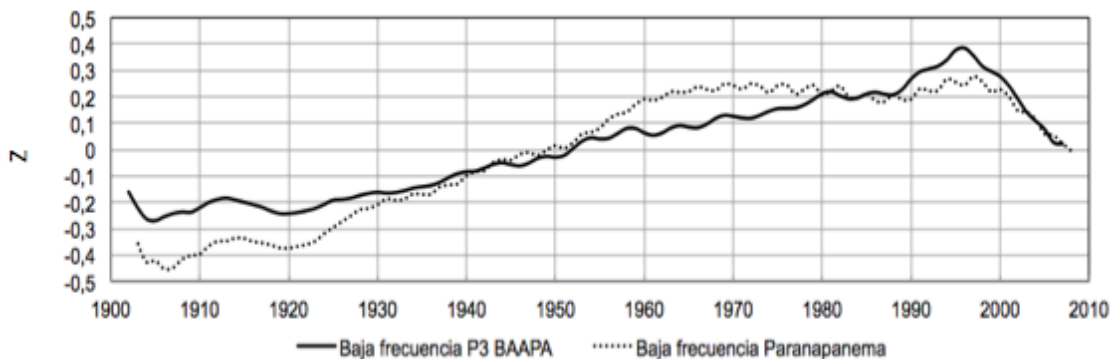


Fig. 5-8: Componentes principales de baja frecuencia determinadas para las P en la subcuenca P3 BAAPA y la cuenca del río Paranapanema.

De este análisis se obtiene que los Q y las P en áreas de diferentes escalas espaciales dentro de la subcuenca P3 BAAPA tienen comportamientos similares. En base a esto se asume que la relación precipitación-uso de suelo-caudal se dio de igual manera a diferentes escalas en la subcuenca P3 BAAPA.

## **5.6 Resumen**

Se concluye que para la cuenca P3 BAAPA los aumentos de Q considerando los periodos antes y después de 1970 son estadísticamente significativos, y dependientes principalmente a factores no atribuibles a la P, la cual además en dicho periodo no presenta un aumento estadísticamente significativo. Este aumento de Q se encontró a diferentes escalas dentro de la subcuenca P3 BAAPA.

La ET determinada a partir del balance hídrico está relacionada con los cambios de uso de suelo encontrados en la subcuenca, donde la deforestación del BAAPA se intensifica en la década de 1960 y las ET disminuyen acompañando dicha deforestación hasta el año 1995 donde se estabilizan.

## Capítulo 6: Análisis hidrológico de la subcuenca P4

Como se definió anteriormente, la subcuenca P4 está conformada por las áreas afluentes al río Paraná entre las estaciones Posadas y Guaira así como se observa en la Fig. 6-1. Al igual que en la subcuenca P3 BAAPA, se analizan otras cuencas con diferentes escalas espaciales, en este caso las cuencas del río Ñacunday y la del río Iguazú (Fig. 6-1).

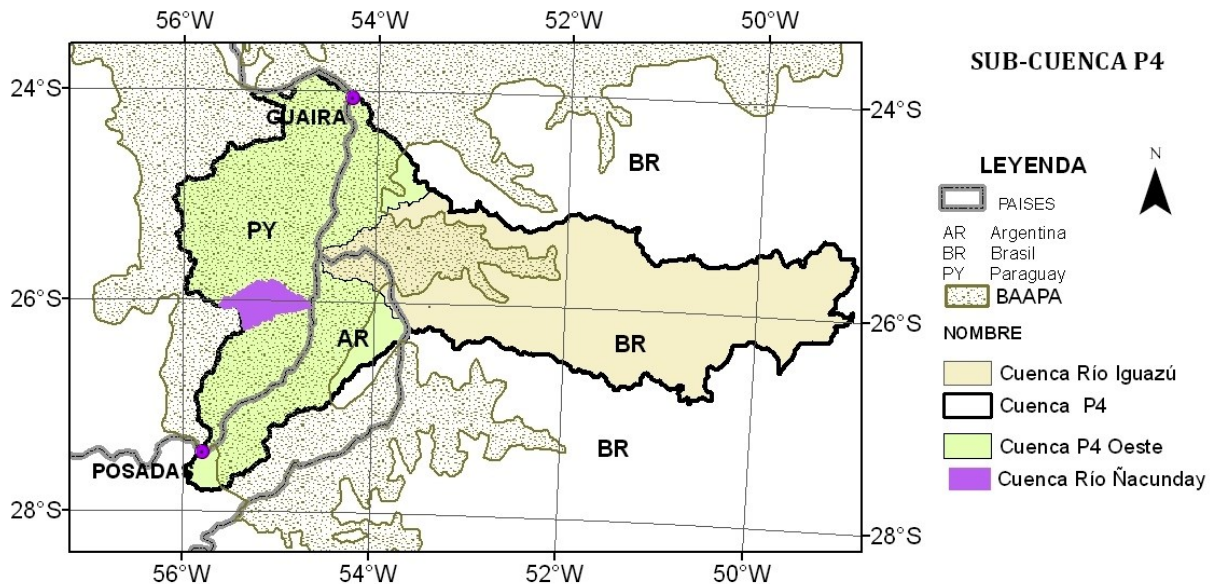


Fig. 6-1: Subcuenca P4 y cuencas de estudio dentro de la misma y cobertura del BAAPA.

A fin de obtener los  $Q$  anuales que se producen en la subcuenca P4, se restan los  $Q$  de la estación Guaira a los de la estación Posadas, y se obtiene así una serie para el periodo 1931-2009. Las series de  $P$  y  $T$  se obtienen de la base de datos CRU para el periodo 1900-2009 utilizando la metodología citada en el capítulo 3.

El  $Q$  medio de P4 para el periodo 1931-2009 se estima en  $3.077 \text{ m}^3/\text{s}$  que equivale a una lámina de agua sobre la superficie de 63 mm mensuales, siendo la  $P$  media mensual de 138 mm. La  $T$  media anual resulta ser de  $20,12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los  $Q$  producidos en P4 representan el 24% del total en Posadas.

Así como se realizó en P3 BAAPA, se analizan las tendencias de las series con el test de Mann-Kendall. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6-1, donde se observa que el p-

zscore de todas las variables es inferior a 0,1 lo que indica que todas tienen tendencias significativas y positivas.

Tabla 6-1: Valores del Test de Mann-Kendall utilizando el Seasonal Mann-Kendall Test, para Q, P, y T de la subcuenca P4.

	Q (1931-2009)	P (1901-2009)	T (1901-2009)
K	434	876	2219
Zscore	1,904	2,323	5,888
p zscore	0,0568	0,0202	0

A partir de estas tendencias significativas, se realiza un análisis más detallado de las mismas. Para esta cuenca se vuelve a trabajar con las variables normalizadas, siguiendo la misma metodología aplicada para P3 BAAPA.

Las componentes principales de las series normalizadas se obtienen aplicando el método SSA con una ventana de 25 años, ya que la longitud de las series de datos disponibles para esta subcuenca es también de 78 años, como en el caso de P3 BAAPA.

### 6.1 Precipitación en la subcuenca P4

Se inicia el análisis de las variables con la serie de P obtenida para la subcuenca P4. Esta presenta una componente con un periodo de 9 años que explica una varianza de 20,4%, otra componente de 6-7 años que explica el 11,1 % y la de periodo de 3,5-4 años que presenta una varianza de 16,5%. Las oscilaciones de periodo de 9 años están moduladas de forma que su amplitud va aumentando hasta el año 1982 para luego disminuir. La componente de 3,5-4 años posee mayores amplitudes en la década de 1970 y 1980 (Fig. 6-2 a y b). Al igual que en P3 BAAPA la P, está relacionada con la frecuencia del ENOS.

Por último la serie presenta una componente en baja frecuencia que explica una varianza de 5,8%. Esta componente posee una tendencia positiva desde los años '30 hasta mediados de la década de 1990, a partir de 1997 se observa un decaimiento de la señal. En el año 1963 se supera el valor medio histórico y las P continúan creciendo hasta aproximadamente 1997 (Fig. 6-2 c). Las 4 componentes sumadas explican una varianza de 53,7%.

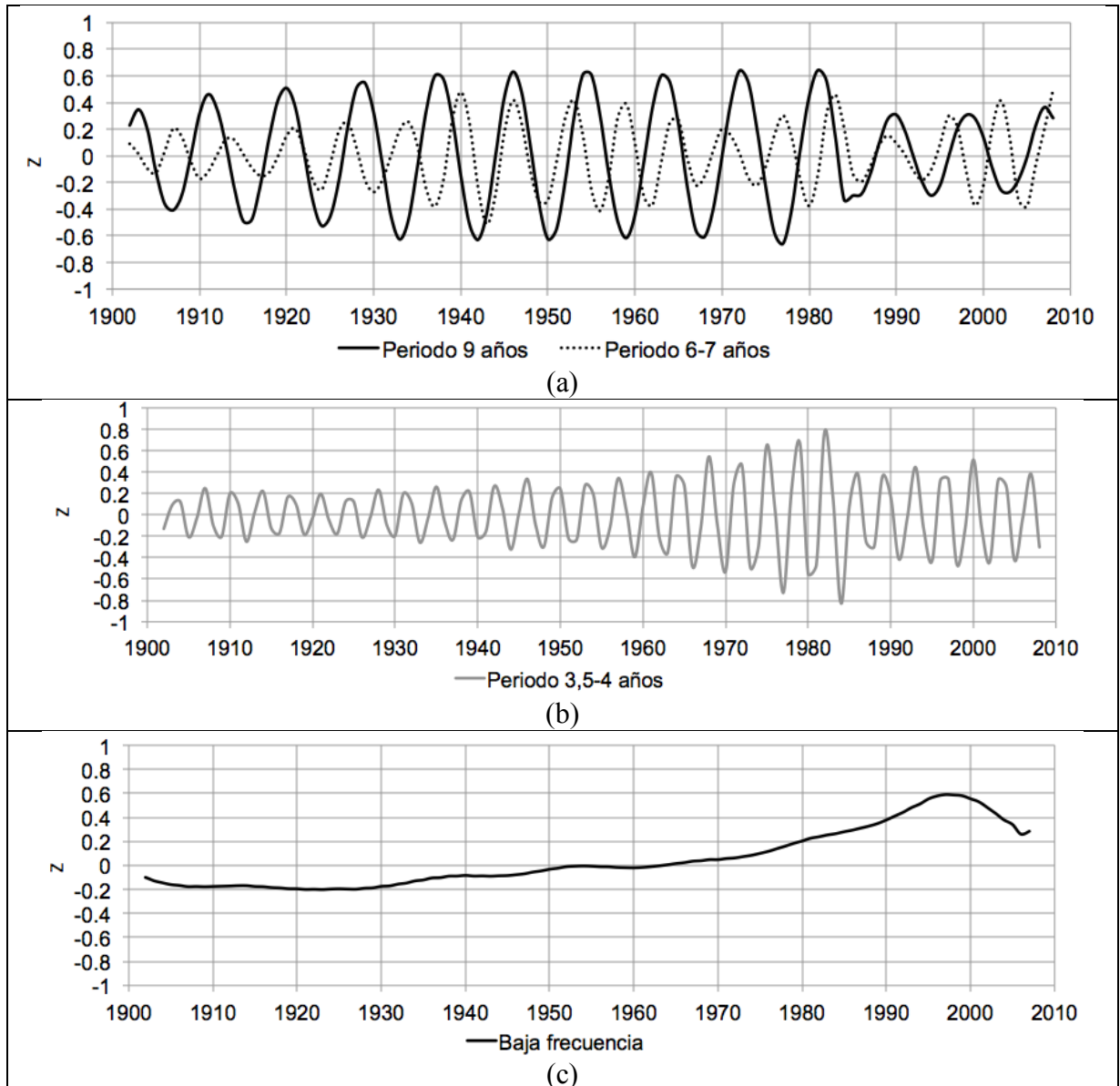


Fig. 6-2: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de P en la subsecuencia P4. En en (a) la componente con oscilación de 9 años y 6-7 años, en (b) la componente de 3,5-4 años y en (c) la componente en baja frecuencia.

## 6.2 Temperatura en la subsecuencia P4

Para esta variable se observa una componente de baja frecuencia que explica una varianza de 30,4% con una tendencia positiva entre 1916-1950 desde donde oscila suavemente, siempre con valores mayores a la media desde 1938 (Fig. 6-3). Por otra parte, se obtiene una componente con un periodo de 3,5-4 años, modulada en la cual las mayores amplitudes se dan entre los años 1940 y 1960 (Fig. 6-3). Esta componente explica el 9% de la varianza total y las suma de las 2 componentes 39,4 % de la varianza.

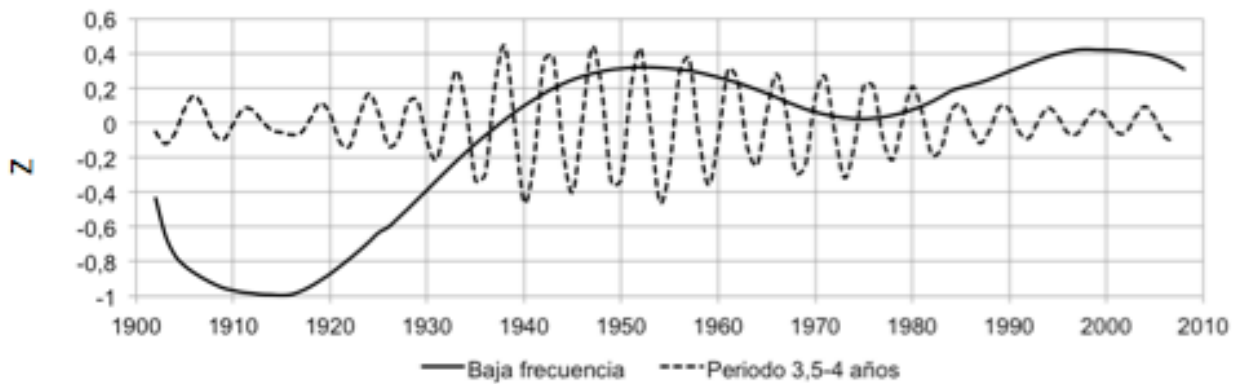


Fig. 6-3: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de T en la subcuenca P4

A diferencia de lo encontrado en la subcuenca P3 BAAPA, en la subcuenca P4, no se observa una tendencia lineal positiva continua en todo el periodo. Se observa que a partir de 1938 la T es siempre superior a la media histórica. El método Seasonal Mann-Kendall Test se utiliza para determinar si esta componente tienen una tendencia significativa. Así, se calcula un p score= 0 con  $K=3566$ , concluyendo que la señal de baja frecuencia de la T efectivamente tiende a crecer.

Nuevamente partiendo del supuesto que ETP depende de T, se infiere que el aumento de T se corresponde con un aumento de ETP. El aumento de las P dentro de la cuenca generaría un ingreso de agua que favorecería la ET. El cambio de uso de suelo claramente afectaría aumentando o disminuyendo la ET.

### 6.3 Caudales en la subcuenca P4

Para la serie de Q se encuentra una componente en baja frecuencia que explica el 15,7% de la varianza. Los valores de la componente en los primeros años de la serie son estables, con una leve tendencia negativa hasta el año 1977. A partir de 1977 se observa una tendencia positiva pronunciada hasta el año 1998, desde donde se ve un decaimiento de la señal hasta el final de la serie (Fig. 6-4-b). Otra componente presente es una oscilación con período de 9 años cuya varianza explica el 14,5% de la variabilidad total. La componente de periodo 3,5-4 años explica una varianza de 12,7% (Fig. 6-4-a).

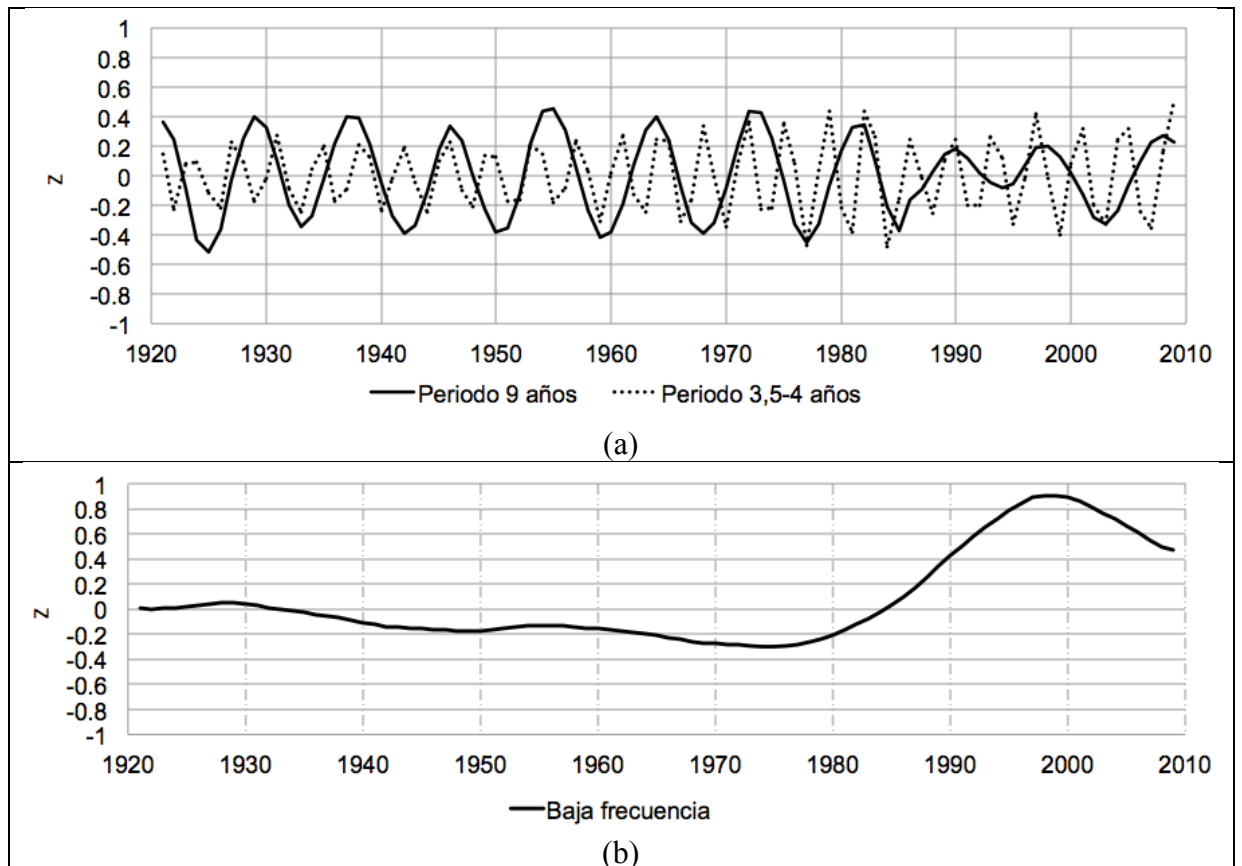


Fig. 6-4: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de Q en la subcuenca P4. Se observa en (a) la componente con periodo de 9 años y 3,5-4 años y en (b) la componente en baja frecuencia.

#### 6.4 Balance hídrico en la subcuenca P4

Se determina la componente de baja frecuencia de ET a partir de las componentes de baja frecuencia de Q y P utilizando la ecuación del balance hídrico simplificado.

La componente de baja frecuencia de la ET calculada y las de P y Q se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Se observa que la ET tiene una tendencia positiva hasta el año 1978, periodo en el que además se observa un aumento de la P y T, donde el balance de la cuenca P4 muestra una disminución de Q (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Cabe destacar que, hasta fines de los años '70, el BAAPA cubría todo el sector oeste de la P4. Los Bosques de Araucarias y el BAAPA cubrían el 60% de la cuenca del río Iguazú para el periodo 1960-1989 y se desforestan recién en la década de 1990, cuando se disminuye a 40% de la cobertura en la cuenca (Bayer y Collischonn, 2014).



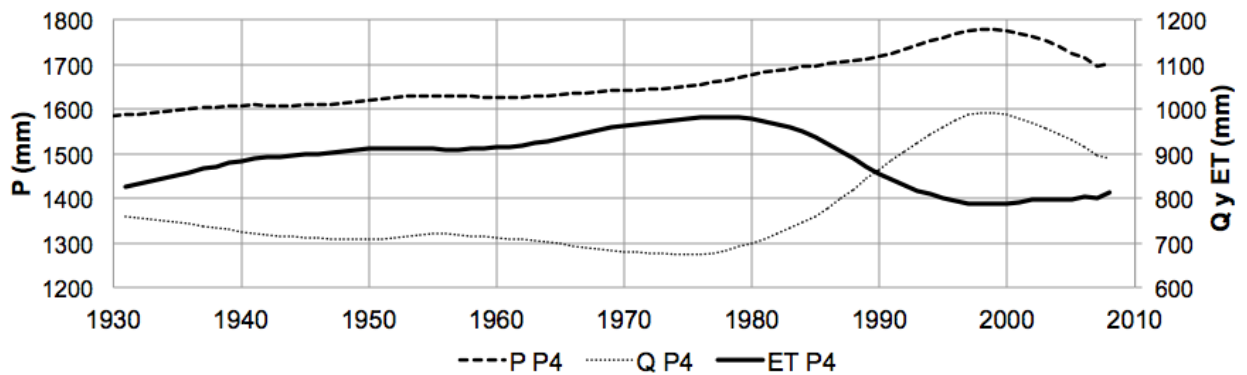


Fig. 6-5: Componentes principales de baja frecuencia de P, Q y  $ET \approx P - Q$  de la cuenca P4.

Es decir, que las variaciones que se observan en las bajas frecuencias de ET están acorde con la permanencia de las áreas forestadas y los aumentos de P y T. A partir 1978 y hasta 1998 la ET muestra una tendencia negativa la cual esta asociada a la perdida de cobertura boscosa ocurrida en dicho periodo en la subcuenca P4. Esta disminucion en la ET impacta en los Q, produciendo un aumento aun mayor a los ocasionados por el aumento de las P (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Hacia fines de la década del '90, la tasa de deforestación disminuye y la ET se estabiliza hasta el final del periodo de análisis. Es por esto que la disminucion de las P parece ser la causa del decaimiento de los Q que se observa a partir 1995 aproximadamente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). +

Para determinar el porcentaje atribuible a la P en el aumento de los Q de la subcuenca P4, se utiliza el método regresivo explicado en la metodología y aplicado para el análisis de la subcuenca P3 BAAPA. En este caso, el corte se hace en el año 1985, ya que los Q fueron superiores a la media a partir de dicha fecha.

La relación entre Q y P de la subcuenca P4 se puede observar en la Fig. 6-6.

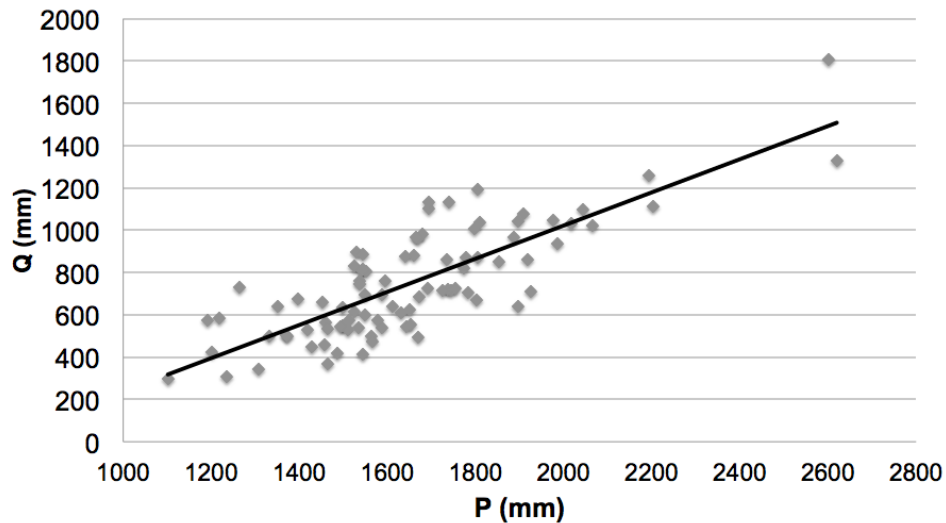


Fig. 6-6: Relación entre Q y P de cada año y su ajuste lineal para la cuenca P4.

La ecuación de la línea de regresión es  $Q = 0,78 \cdot P - 542,96$  con un  $R^2 = 0,81$ . A partir de esta ecuación de regresión y los valores de P y Q, se obtiene que el aumento de Q es de 187 mm donde 82 mm es atribuible a la P y 105 mm corresponden a otros factores. Es decir que el 44% del total del aumento de Q después de 1985 es atribuible a la P en esta cuenca.

### 6.5 Análisis de los Q y las P a diferentes escalas en la subcuenca P4

Con el objetivo de conocer el comportamiento de los Q y P a diferentes escalas dentro de la subcuenca P4, en especial en la componente de baja frecuencia, se analizan estas variables en la cuenca del río Iguazú y del río Ñacunday.

En la descripción del área de estudio se menciona que la cuenca del río Iguazú representa la mitad de la subcuenca P4 y en promedio produce la mitad de los Q. Además cabe resaltar que las mayores P dentro de la CARP ocurren en la cuenca del río Iguazú.

Teniendo en cuenta estas particularidades, se analiza la relación del aporte de agua del río Iguazú con el total de la subcuenca P4, para todo el periodo. El objetivo de este análisis es determinar si el comportamiento del río Iguazú es diferente al del total de la subcuenca P4.

Se calcula año a año el porcentaje que representa el Q del Iguazú en el Q total de la subcuenca P4. La serie con el porcentaje de aporte del río Iguazú a la subcuenca P4 se muestra en la Fig.

6-7. Se observa que al inicio de la serie los aportes constituyen el 50% de los Q en promedio, hasta fines de la década de 1960 cuando aporta en promedio el 70% del Q total. En el año 1983 nuevamente el aporte del río Iguazú disminuye para representar en promedio, el 47% de los caudales producidos en P4. En la Fig. 6-7 se observa que las P no presentan variaciones que justifiquen el comportamiento de los Q.

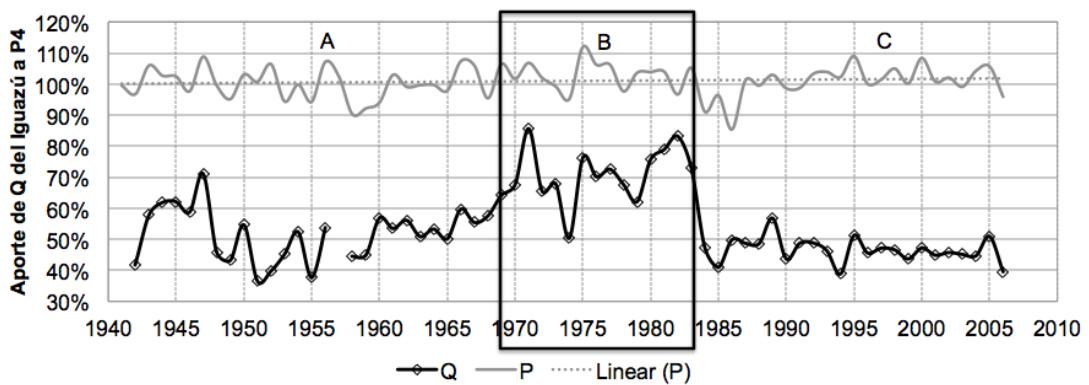


Fig. 6-7: Aporte de Q de la cuenca del río Iguazú en la subcuenca P4 y relación de la precipitación entre ambas áreas. En recuadro periodo de cambio del aporte de Q del Iguazú.

Para determinar si estos cambios en el aporte del Iguazú son significativos estadísticamente, en la serie estudiada, se utiliza el test t-student con una significancia de 95% para las series antes y después del periodo 1969-1983, en cada comparación se considera la misma cantidad de datos entre periodos a analizar.

En la Tabla 6-2 se observa que existen diferencias significativas en las medias del periodo 1969-1983 y el periodo 1953-1969. Posterior a 1983 las medias de los aportes del río Iguazú vuelven a ser iguales estadísticamente a las del periodo anterior a 1969. Es decir en el periodo 1969-1983 pudieron ocurrir procesos diferentes en la cuenca del río Iguazú que cambiaron el aporte de agua de ésta a la subcuenca P4. En los análisis posteriores se estudiará la razón de dicho cambio en el aporte del río Iguazú.

Tabla 6-2: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias con una significancia de 95%.

	Periodo A y B		Periodo A y C	
	1953-1968	1969-1983	1948-1968	1984-2006
Media	0,510	0,699	0,495	0,466
Varianza	0,004	0,007	0,005	0,002
Datos	16	15	21	23
Grados de libertad	26		31	
$t_{est}$	17,2761		11,6961	
$P(T \leq t)$ dos colas	0,000		0,100	
$t_{crit}$	2,056		2,040	

En el análisis de las P se tiene que las componentes de baja frecuencia se comportan de igual forma en las 3 áreas, explicando un varianza de 5,8%, 6,9% y 4,5% en P4, Iguazú y Ñacunday respectivamente. Las diferencias se observan al final de la serie donde la serie de la cuenca del río Iguazú presenta valores mayores y la de la cuenca del río Ñacunday menores. Además se observa que a partir de 1965 todas las 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 (Fig. 6-8).

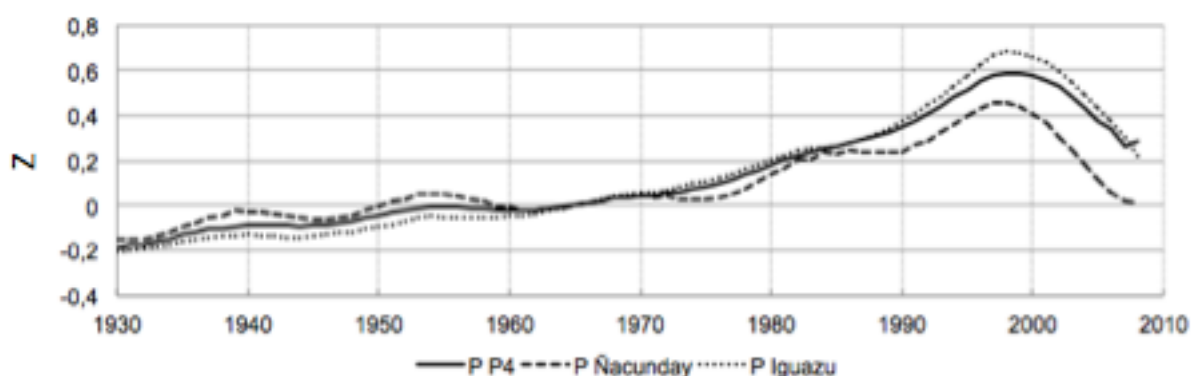


Fig. 6-8: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de P en la subcuenca P4, Iguazú y Ñacunday.

Las series de Q muestran una componente de baja frecuencia en todas las cuencas, siendo 13,46% la varianza explicada en la cuenca del río Iguazú y 38% la varianza en el río Ñacunday. Teniendo en cuenta el salto observado en la Fig. 6-7 se comparan las componentes en baja frecuencia de los Q del río Iguazú y los de la subcuenca P4 (ver Fig. 6-9). Se observa que los Q en el río Iguazú empiezan a aumentar en la década de 1950 y para el año 1970 los

mismos presentan valores superiores a la media hasta el final de la serie. En contraste, la serie de la subcuenca P4 recién en el año 1977 empieza a tener una tendencia positiva, donde a partir de 1985 los valores son superiores a la media del periodo. Esta diferencia en las componentes de baja frecuencia podría explicar la diferencia de aportes encontrada en el análisis inicial para el periodo 1969-1983.

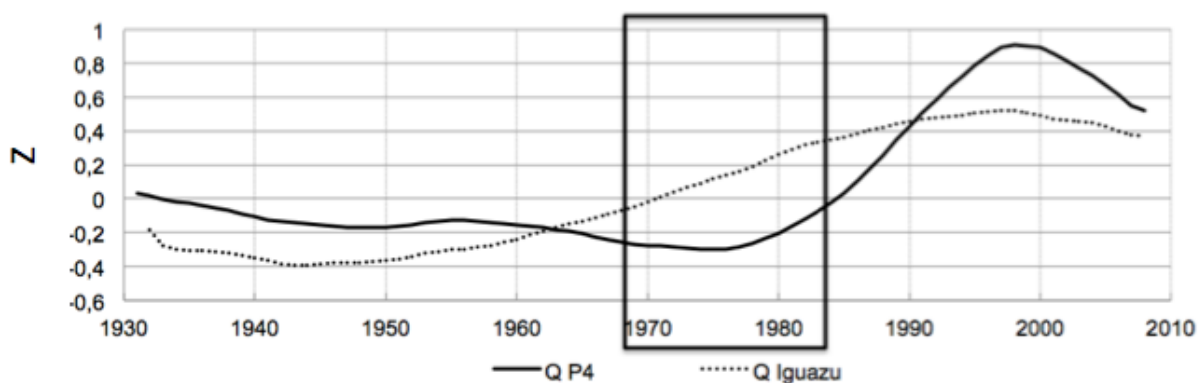


Fig. 6-9: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de Q en la subcuenca P4 e Iguazú. En recuadro periodo de cambio del aporte de Q del Iguazú.

Como los Q en la subcuenca P4 se forman de los aportes del río Iguazú y de las cuencas de P4 Oeste, se analiza la serie de los Q producidos en P4 Oeste. El Q anual de P4 Oeste se obtiene restando los Q del río Iguazú a los de la subcuenca P4.

En la serie de Q P4 Oeste se obtiene una componente en baja frecuencia que explica una varianza de 40%. Esta componente posee una tendencia negativa desde el año 1955 hasta el año 1977, donde inicia una tendencia positiva la cual supera el valor medio en el año 1987, y llega hasta el año 1997. Al igual que en las demás componentes de Q la señal decae hasta el final de la serie (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Como se determinó en los capítulos anteriores la cuenca P4 Oeste contaba con 64% de cobertura del BAAPA hasta el año 1980, a partir de donde los cambios de uso de suelo reducen esta cobertura hasta solo el 34% en el año 2000, este periodo coincide con el periodo de aumento de los caudales en la subcuenca P4 Oeste.

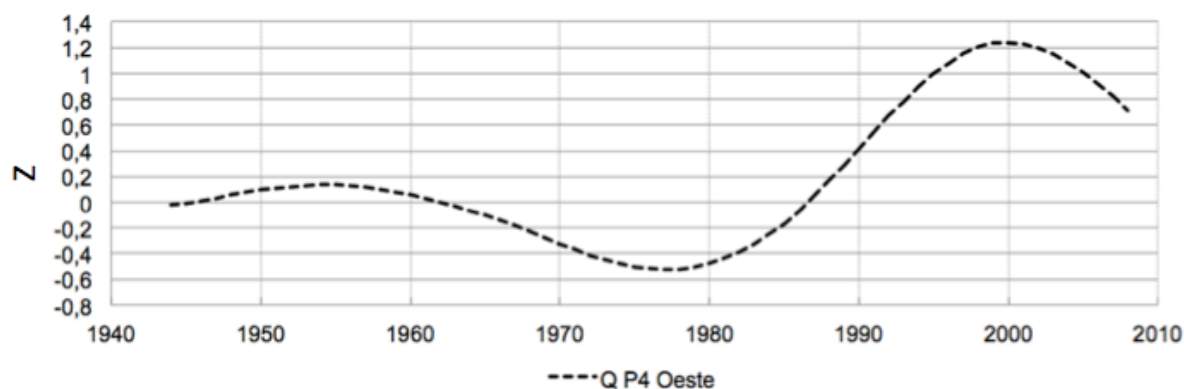


Fig. 6-10: Reconstrucción de la componente en baja frecuencia de Q en la P4 Oeste.

Finalmente se determina la componente en baja frecuencia de los Q en el río Ñacunday, la cual se muestra en la Fig. 6-11. 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. Al igual que las demás componentes de baja frecuencia de Q, la señal decae hasta el final de la serie.

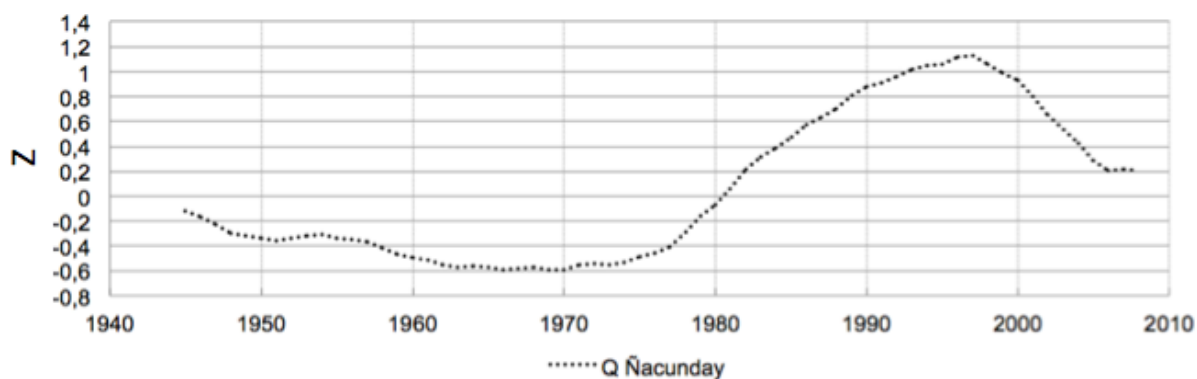


Fig. 6-11: Reconstrucción de las componentes principales de la serie de Q cuenca del río Ñacunday.

En la cuenca del río Ñacunday se analiza en detalle 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 58% del BAAPA en la cuenca del río Ñacunday. Esto ocasiona una disminución de la ET de 17 mm, la cual con el aumento de las P, en la cuenca, resulta en un aumento de 37 mm en los Q del río Ñacunday (Fig. 6-12). 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. Se

debe tener en cuenta que durante dicho período la cobertura boscosa en la cuenca del Ñacunday era escasa y el uso de suelo principal eran los cultivos anuales.

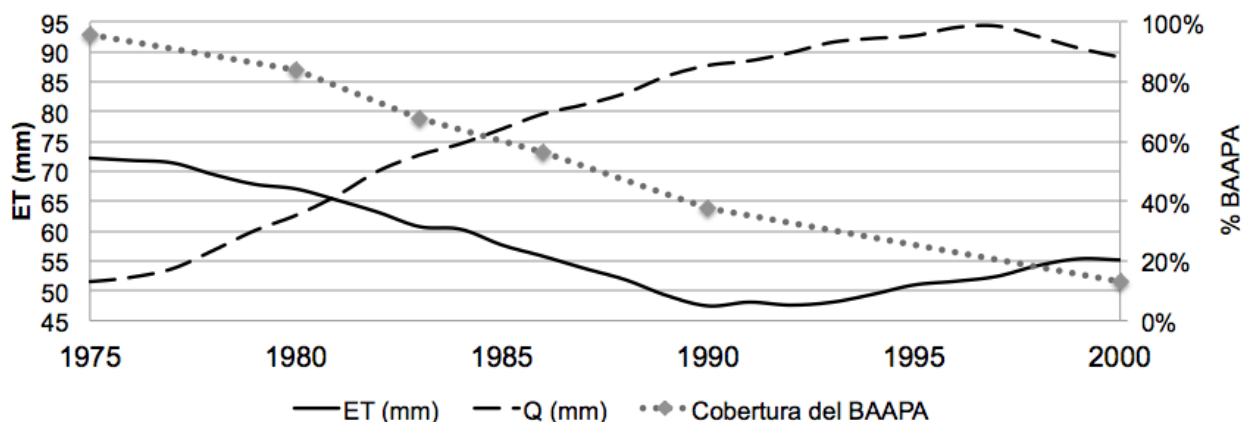


Fig. 6-12 Q y ET en mm (medias mensuales), y cobertura del BAAPA en %, para la cuenca del río Ñacunday.

El comportamiento de las variables del balance hídrico, en especial el Q, encontrado en la cuenca del río Ñacunday es similar al determinado para las cuencas de P4 Oeste, Estos resultados asociados a los cambios de uso determinado en el capítulo 4, sugieren que todas las cuencas dentro del territorio Paraguayo tendrían un comportamiento similar.

Finalmente se determina el porcentaje atribuible a la P y a los otros factores que contribuyeron al crecimiento de los Q en las áreas de la subcuenca P4 utilizando la técnica regresiva. Al igual que en la P4, se tomó el año 1985 como año de corte para así poder comparar los resultados. Para la cuenca del río Iguazú se considera además como año de corte 1970, ya que a diferencia de las demás áreas de P4 a partir de dicho año el Q medio es superior a la media en dicha cuenca.

Las ecuaciones de regresión resultantes para cada área de la subcuenca P4 se presentan en la Fig. 6-13.

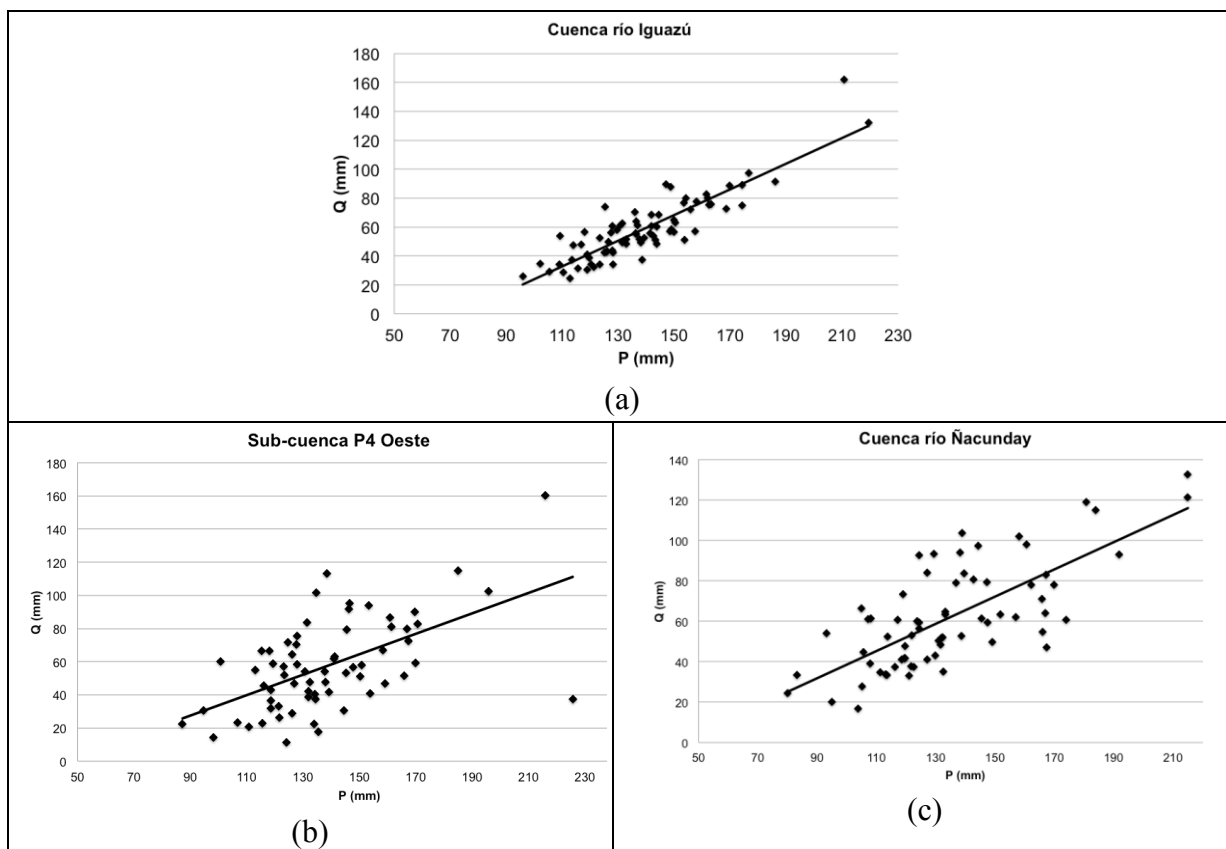


Fig. 6-13: Relación entre Q y P (medias mensuales) de cada año y su ajuste lineal para (a) Cuenca río Iguazú (b) Subcuenca P4 Oeste y (c) Cuenca río Ñacunday

A partir de la ecuación de regresión y los valores de P y Q se calculan los términos de la Ec. 2-5, cuyos valores para todas la cuencas se presentan en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3: Medias de las variables para el periodo antes y después del año de corte, de la Ec. 2-5 y parámetros de la regresión lineal definida por la Ec. 2-4. Todos los valores están en mm (expresados en medias mensuales) a excepción de a y  $R^2$ .

	Año de corte	$Q_1$	$Q_2$	$P_1$	$P_2$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	a	b	$R^2$
Cuenca P4	1985	58,0	72,3	134,9	143,3	-2,22	5,38	0,78	-45,4	0,81
Subcuenca P4 Oeste	1985	45,6	78,4	135,9	142,9	-10,20	18,28	0,62	-28,1	0,57
Cuenca río Ñacunday	1985	51,5	82,1	133,0	138,9	-9,23	17,30	0,67	-28,8	0,53
Cuenca río Iguazú	1983	54,7	67,2	136,2	145,3	-1,36	3,07	0,89	-64,9	0,88
Cuenca río Iguazú	1970	49,9	67,1	133,5	144,5	-3,70	3,70	0,89	-64,9	0,88



Se calculan los porcentajes del aumento de los Q dependientes de la P en cada cuenca. Considerando los periodos antes y después de 1985 en la subcuenca P4 Oeste se calcula que solo es dependiente de la P el 13% de los aumentos, justamente en la cuenca P4 Oeste los cambios de uso de suelo ocurren principalmente en las décadas de 1980 y 1990 por lo que estos son responsables en gran parte del 87% de los aumentos.

En la cuenca del río Ñacunday se establece de igual manera que la P es responsable solo del 13% de los aumentos de los Q, donde también las mayores pérdidas del BAAPA ocurren entre los años 1980-2000. En general se observa que el comportamiento del Q encontrado en una de las cuencas es similar al total de las cuencas que conforman la subcuenca P4 Oeste.

Cabe resaltar que los cambios de uso de suelo en el periodo 1980-2000 ocurren principalmente en las cuencas ubicadas en Paraguay por lo que el aumento de Q encontrado en la subcuenca P4 Oeste estaría relacionado principalmente a la deforestación ocurrida en Paraguay.

En la cuenca del río Iguazú la P es responsable del 64% de los aumentos de Q para los periodos antes y después de 1985 y además es atribuible a la P el 57% de los aumentos de Q considerando como año de corte 1970. Esto concuerda con Bayer y Collischonn (2014) que mostraron que no se dieron cambios de uso de suelo en dicha cuenca entre la década del '60 y '80. La relación entre los Q y la P en la cuenca del río Iguazú y la presencia de bosques en P4 Oeste hasta la década de 1980, explicaría el cambio de aporte de la cuenca del río Iguazú en la década del '70.

Finalmente se determina si los cambios en los valores medios de los Q y las P son estadísticamente significativos considerando estos periodos en la subcuenca P4. Se utiliza el test t-student. En la Tabla 6-4 y Tabla 6-5 se muestran los valores obtenidos con el test t-student aplicado. Se observa que para el periodo anterior y posterior a 1985 en todas las series de Q se tienen diferencias significativas pero en las P no se encuentran diferencias significativas.

Tabla 6-4: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias de Q con una significancia de 95%.

	$Q_1 P4$	$Q_2 P4$	$Q_1 P4$ Oeste	$Q_2 P4$ Oeste	$Q_1$ Iguazú	$Q_2$ Iguazú
Media	56,8	73,6	45,6	78,4	54,7	67,2
Varianza	366,0	562,3	426,4	710,3	498,6	463,4
Datos	55	24	43	24	54	24
Grados de libertad	37		39		46	
$t_{est}$	13,11		15,21		12,341	
P(T<=t) dos colas	0,0		0,0		0,0	
$t_{crit}$	2,3		2,3		2,32	

Tabla 6-5: Parámetros del análisis estadístico t-student para determinar igualdad o diferencia entre medias de P con una significancia de 95% en las subcuencas de P4. Los subíndices indican los periodos antes (1) y después (2) de 1985

	$P_1 P4$	$P_2 P4$	$P_1 P4$ Oeste	$P_2 P4$ Oeste	$P_1$ Iguazú	$P_2$ Iguazú
Media	133,68	143,65	134,21	142,95	134,21	147,08
Varianza	390,99	562,01	480,46	622,37	480,46	669,57
Datos	84	24	84	24	84	25
Grados de libertad	33		34		35	
$t_{est}$	11,881		11,551		12,261	
P(T<=t) dos colas	0,07		0,13		0,03	
$t_{crit}$	2,35		2,35		2,34	

## 6.6 Resumen

Para la subcuenca P4 se determinó que el aumento del Q medio ocurre en el año 1985, siendo atribuible a la P el 47% de los mismos. En esta subcuenca se manifiesta la suma de los comportamiento de la cuenca del río Iguazu y la de la subcuenca P4 Oeste.

La cuenca del Río Iguazú, representa el 50% del área de la subcuenca P4, presentó el aumento del Q medio después del año 1970, aumento que es atribuible a la P en un 57%. En esta cuenca las diferencias entre las medias de Q y P entre ambos periodos son estadísticamente significativas con valores de 17,22 y 12,22 mm, respectivamente.

Para la subcuenca P4 Oeste, que está conformada por las demás cuencas afluentes al río Paraná dentro de P4, se encuentra que el aumento del Q medio se produce en el año 1987,

aumento que solo es atribuible a la P en 13%. Las diferencias entre las medias de Q y P entre ambos periodos son de 32,8 y 8,74 mm, respectivamente, donde solo en los Q esta diferencia es estadísticamente significativa. Cabe resaltar que las mayores pérdidas de BAAPA en esta subcuenca ocurren en las décadas de 1980 y 1990 principalmente en las cuencas ubicadas en Paraguay.

La ET determinada a partir del balance hídrico está relacionada con los cambios de uso de suelo encontrados en la subcuenca y en las demás áreas analizadas dentro de ella, donde la deforestación del BAAPA ocurre de forma acelerada en las décadas de 1980 y 1990, periodo en el cual las ET disminuyen acompañando dicha deforestación hasta el año 1995 donde se estabilizan coincidiendo con la finalización del proceso de deforestación acelerada del BAAPA.

## **Capítulo 7: Conclusiones**

En esta tesis se analizó el efecto de la deforestación del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA) en las diferentes componentes del balance hídrico en la Cuenca Alta del Río Paraná (CARP). Para este estudio se consideraron 2 subcuencas con diferentes patrones de deforestación.

El análisis del NDVI mostró que gran parte del territorio brasilero de la CARP no contaba con bosques en el año 1982, mientras que el Paraguay presentó una disminución del NDVI asociado a un cambio de uso de suelo para el periodo 1982-1999. La Argentina para el mismo periodo no presentó cambios en el NDVI, manteniendo hoy en día gran parte de su cobertura boscosa. El análisis detallado del territorio del BAAPA, en el periodo 1980-2000, reveló que en las cuencas de Paraguay se registraron las mayores pérdidas de bosques en la década del '80. 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 las áreas y los periodos críticos para determinar el impacto del cambio de uso de suelo en los Q y el balance hídrico.

La transformación de bosques, principalmente a cultivos anuales, produce cambios en la ET. El producto de ET de MODIS puso de manifiesto que el bosque evapotranspira el 80% de la P mientras que un cultivo anual evapotranspira solo el 50% de la P. Es decir que la pérdida local de agua por evapotranspiración se modifica a medida que crece la deforestación en la cuenca. Estos cambios no solo implican una disminución de la cantidad de agua evapotranspirada sino que también modifican el ciclo anual de la ET, que no siempre coincide con los patrones de precipitación. Las variaciones de la ET en las cuencas se vieron reflejadas en los Q ya que aumenta la disponibilidad de agua para escurrir.

Por otra parte, el análisis de las series históricas de las variables P, T y Q, utilizando el método SSA, permitió lograr el objetivo propuesto en esta tesis; 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 series, sin importar el tamaño de la cuenca, presentan tendencias positivas y estadísticamente significativas. Cabe destacar que en las series de P y Q se observaron señales de periodos de 9 años y de 3,5-4 años, que están asociadas a fenómenos climáticos por lo que no se las consideró en detalle en esta tesis.

El análisis de las áreas con diferentes historias de deforestación resultó en la caracterización del efecto de la misma en el balance hídrico. En efecto, en la cuenca P3 BAAPA, donde la deforestación se inició en los años '50 e intensificó en los años '60, se observó que los Q comenzaron a aumentar a partir del año 1950. Las modificaciones de Q fueron influenciadas además por el aumento de las P, las cuales muestran ya una tendencia positiva desde principios de los años 20. Estas características fueron independientes de la escala de análisis.

En la subcuenca P3 BAAPA la serie de ET determinada a partir del balance hídrico, reflejó los cambios de uso de suelo ocurridos en ella. En efecto la ET aumentó entre las décadas del '30 y '50, periodo donde el bosque no se deforestó mientras T y P aumentaban. Posteriormente se observó una disminución de la ET durante 1960-1990, cuando la pérdida del bosque fue intensa. A partir de 1996, la tasa de deforestación es considerablemente menor y la ET se volvió casi constante.

Por otro lado, 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. En esta tesis se demostró que estos cambios produjeron grandes aumentos en los Q. La ET determinada a partir del balance hídrico también reflejó la deforestación. En efecto, 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.

Es destacable que la P registró tendencias positivas, en todas las cuencas analizadas, hasta mediados de la década de 1990. Estos aumentos de P fueron la causa del 21% y 47% de los aumentos de Q en las subcuencas P3 BAAPA y P4 , respectivamente.

La deforestación acentuó el proceso de transformación P-Q, ya que aumentó la capacidad de escurrimiento y disminuyó el tiempo de respuesta. Este fenómeno pudo ser la causa de la abrupta disminución de los caudales que se observó a partir del año 2000 en toda la CARP. 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.

Se enfatizó el estudio de las áreas donde se pudo describir el proceso de deforestación ocurrido entre los años 1980 y 1990. Se encontró que en el Paraguay se deforestó 40% del BAAPA en 20 años. Coincidentemente en dicho periodo se registraron aumentos de Q de hasta un 50%, siendo que la P fue causal de solo un 13% de los aumentos de Q. En particular, se enfatiza la situación de la subcuenca P4 Oeste, en la que queda aún 35% de cobertura boscosa. Esta cobertura se encuentra principalmente en las cuencas argentinas, lo cual en caso de ser deforestadas podrían causar cambios en la tasa de escorrentía.

En esta tesis se mostró 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.

## Bibliografía

1. Allen M. R. y Smith L.A., 1996 Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of coloured noise, *J. Clim.*, 9,3373–3404.
2. Amarasekera K.N., Lee R.F., Williams E.R. y Eltahir E.A.B., 1997. ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers, *Journal Hydrology*, 200: 24-39
3. André J.-C., Bougeault P., Mahfouf J.F., Mascart, P., Noilhan J. y Pinty J.P., 1989. Impact of forests on mesoscale meteorology, *Philos. Trans. R. Soc. Ser. B* 324, 407–422.
4. Antico A., Schlotthauer G. y Torres M. E. , 2014. Análisis de la variabilidad hidroclimática 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.
5. Avissar R. y Werth D., 2005. Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation. *J. Hydrometeorology*. 6: 134-145.
6. Azzali S. y Menenti M., 2000. Mapping vegetation–soil–climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data. *Int. J. Remote Sens.*, 21 (5), 973–996.
7. Baldi G., Noretto M.D., Aragón R., Aversa F., Paruelo J.M. y Jobbágy E.J. ,2008. Long-term satellite NDVI datasets: Evaluating their capacity to detect functional ecosystem changes in South America. *Sensors* 8: 5397-5425.
8. Baez J., 2006. Tendencias climáticas e hidrológicas en la cuenca del Plata. *El cambio climático en la Cuenca del Plata*. Barros, Clarke, Silva Dias (eds.): Ed. CIMA, 12-18.
9. Barbosa H.A., Huete A.R. y Baethgen W.E., 2006. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *J.Arid Environ.*, 67, 288–307
10. Bayer D. M. y Collischonn W., 2013. Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, 165-179.
11. Bayer D. M., Collischonn W., 2013 . Deforestation impacts on discharge of the Ji-Paraná River ? *Brazilian Amazon*. IAHS-AISH Publication, v. 359, 327-332.
12. Berbery, E. H. y Barros, V. R., 2002. The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. *Journal of Hydrometeorology*, 3(6), 630-645.
13. Bi H., Liu B., Wu J., Yun L.,Chen Z. y Cui Z., 2009. Effects of precipitation and land use on runoff during the past 50 years in a typical watershed in the Loess Plateau, China. *Int. J. Sediment Res.*, 24 (3) (2009), 352–364.

14. Bosch J.M. y Hewlett J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration *Journal of Hydrology* 55: 2-23.
15. Boyd D.S. y Danson F.M. 2005. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography* 29, 1 1–26.
16. Bradshaw C.J.A., Sodhi N.S., Peh K.S.-H. y Brook B.W., 2007. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology*, 13 (11), pp. 2379-2395.
17. Braga B., Tucci C.E.M., Souza Filho F.A., Marengo J.A., Molion L.C.B., Clarke R.T., Soares W.R. y Collischonn W., 2003. *Clima e recursos hídricos no Brasil. Volume Coleção ABRH V.9. Porto Alegre.*
18. Breunig F. M.; Galvao L.S.; Formaggio A.; Epiphanyo J.C.N., 2011. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Amsterdam, v.13, n.1, p.34-42.
19. Brivio P. A., Giardino C., Zilioli E., 2001. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing* 2001, 22, 487-502.
20. Bruijnzeel L.A., 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state of knowledge review. IHP. IAHS. UNESCO.224.
21. Bruijnzeel L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soils for the trees. *Agriculture Ecosystems and Environment* 104, pp. 185–228.
22. Brutsaert W., 2005. *Hydrology. An Introduction.* Cambridge University Press, New York, USA, 605.
23. Camilloni I. y Barros V., 2000. The Paraná river response to El Niño 1982-83 and 1997-98 events. *Journal of Hydrometeorology*, 1(5), 412-430.
24. Camilloni I. A., y Barros V., 2003. Extreme discharge events in the Paraná river and their climate forcing. *Journal of Hydrology*, 278(1-4), 94-106.
25. Chander G., Markham B. Helder D., 2009, Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893–903.
26. Cohen W., Kushla J., Ripple W., Garman S., 1996. An introduction to digital methods in remote sensing of forested ecosystems: focus on the Pacific Northwest, USA. *Environmental Management* 20 (3), 421–435.



27. Collischonn W., Tucci C., Clarke R.T., 2001. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change?. *Journal of Hydrology* 245 (1), 218-238.
28. Coppin P.R. y Bauer M.E., 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews* 13, 207–234.
29. Costa M.H., Botta A., Cardille J.A., 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology* 283, 206–217.
30. Di Bitetti M.S; Placci G; y Dietz L.A., 2003. Una visión de biodiversidad para la ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná, Washington, D.C., World Wildlife Fund, 155 p [http://www.wwf.org.py/lineas\\_accion/vision\\_de\\_biodiversidad/](http://www.wwf.org.py/lineas_accion/vision_de_biodiversidad/).
31. Doyle M. E. y Barros V. R., 2011. Attribution of the river flow growth in the Plata basin. *International Journal of Climatology*, 31(15), 2234-2248.
32. Ferreira L. G. y Huete A. R, 2004: Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. *Int. J. Remote Sens.*,10, 1837–1860.
33. Gámiz-Fortis S.R., Pozo-Vázquez D., Esteban-Parra M.J., Castro-Díez Y., 2002. Spectral characteristics and predictability of the NAO assessed through singular spectral analysis. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D23), 4685.
34. Gámiz-Fortis S.R., Esteban-Parra M.J., Trigo R.M., Castro-Díez Y., 2010. Potential predictability of an Iberian river flow based on its relationship with previous winter global SST. *Journal of Hydrology*, 385, 143–149.
35. Gámiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., Pozo-Vázquez, D. y Castro-Díez, Y., 2011a. Variability of the monthly European temperature and its association with the Atlantic sea-surface temperature from interannual to multidecadal scales. *Int. J. Climatol.*, 31: 2115–2140.
36. Gámiz-Fortis S. R., Hidalgo-Muñoz J.M., Argüeso D., Esteban-Parra M.J. y Castro-Díez Y., 2011b. Spatio-temporal variability in Ebro river basin (NE Spain): global SST as potential source of predictability on decadal time scales *J. Hydrol.*, 409 (3–4),759–775.
37. García N.O. y Vargas W.M., 1996. The spatial variability of runoff and precipitation in the Rio de la Plata basin. *Hydrological Sciences Journal* 41: 279–299.
38. García N.O., 2000. Análisis de la variabilidad climática de la Cuenca del Río de la Plata, a través de los caudales de sus principales ríos. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 130.

39. García, N. y Mechoso, C. R., 2005. Variability in the discharge of South American rivers and in climate, *Hydrological Sciences Journal*, 50: 3, 1 — 478.
40. Ghil M. y Vautard R., 1991. Interdecadal oscillation and the warming trend in global temperature time series. *Nature* 359: 324–327.
41. Ghil M., Allen R. M., Dettinger M.D., Ide K., Kondrashov D., Mann M. E., Robertson A. W., Saunders A., Tian Y., Varadi F. y Yiou P., 2002 Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys.* 40(1), 3.1–3.41.
42. Glenn E. P., Huete A. R., Nagler P. L. y Brown, P., 2007. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(3), 139–168.
43. Golyandina N., Nekrutkin V. y Zhigljavsky A., 2001. Analysis of time series structure: SSA and related techniques. *Monographs on Statistical and Applied Probability* 90. CRC Press. Boca Raton, Florida, 305.
44. Hansen M, DeFries R., 2004. 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* (N Y, Print) 7:695–716.
45. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O. y Townshend J.R.G., 2013. “High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change.” *Science* 342 (15 November): 850–53. Data available on-line from: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.
46. Hernández-Martínez, M., J. M. Hidalgo-Muñoz, S. R. Gámiz-Fortis, Y. Castro-Díez, and M. J. Esteban-Parra(2014), Temporal variability and potential predictability of the streamflow regimes in the North-Eastern Iberian Peninsula, *River Res. Appl.*
47. Hewlett J.D. y Hibbert A.R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper, W.E. and Lull, H.W., editors, *Forest hydrology*, New York: Pergamon Press, 275–90.
48. Helsel D.R., Mueller D.K. y Slack J.R., 2006. Computer program for the Kendall family of trend tests: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005–5275, 4.
49. Hidalgo-Muñoz J. M., Gámiz-Fortis S. R., Castro-Díez Y., Argüeso D., Esteban-Parra M.J., 2015. Long-range seasonal streamflow forecasting over the Iberian Peninsula using large-scale atmospheric and oceanic information, *Water Resources Research*, 51, 5, 3543.
50. Hirsch R.M., Slack J.R., Smith R.A., 1982, Techniques of trend analysis for monthly water quality data: *Water Resources Research* v. 18, 107–121.

51. Hirsch R.M. y Slack J.R., 1984, A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence: *Water Resources Research* v. 20, 727–732.
52. Huang C., Kim S., Altstatt A., Townshend J.R.G., Davis P., Song K., Tucker C. J., Rodas O., Yanosky A., Clay R., Musinsky J., 2007. Rapid loss of Paraguay's Atlantic forest and the status of protected areas -A Landsat assessment. *Remote Sensing of Environment*, 106, 460-466.
53. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., van Leeuwen W. A, 1997 comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *RemoteSens. Environ*, 59, 440–451.
54. ITAIPU, 2013. Atlas del Potencial Hidroenergetico 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 N° 4500020686/2011. 2013. Paraguay, 31.
55. Jackson J.E., 1991. A user's guide to principal components. John Wiley & Sons. New York, 569.
56. James M. E., Kalluri S.N.V., 1994. The Pathfinder AVHRR land dataset: an improved coarse resolution dataset for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing* 1994, 15, 3347-3363.
57. Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83, 3–15.
58. Kendall M. A., Stuart A., 1967. *The advanced theory of statistics*. 2nd ed. Londres: Charles Griffin, 1967.
59. Krepper C.M., García N.O. y Jones, P. D., 2008. Low-frequency response of the upper Paraná basin. *International Journal of Climatology*, 28(3), 351-360.
60. Krepper C.M y Venturini V., 2009. Assessing interannual water balance of La Plata river basin. *Atmósfera* 22(4), 387-398.
61. Lee S.-J. y Berbery E.H., 2012: Land cover change effects on the climate of the La Plata basin. *J. Hydrometeor.*, 13, 84–102.
62. Leite C.C., Costa M.H., Soare-Filho B.S., Hissa L.B.V., 2012. Historical land use change and associated carbon emissions in Brasil from 1940 to 1995. *Global Biogeochemical Cycle*, 26, 13 p. doi:10.1029/2011GB004133. GB2011.
63. Li Z., Liu W.Z., Zhang X.C. y Zheng F.L., 2009. Impact of land-use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology* 377: 35–42.

64. Li L., Li, B., Liang L., Li Jiu-yi, Liu Yu-mei, 2010. Effect of climate change and land use on stream flow in the upper and middle reaches of the Taoer River, northeastern China. *Forestry Studies in China*. Volume 12, Issue 3, pp 107–115
65. Liu D., Chen X., Lian Y., Lou Z., 2010. Impacts of climate change and human activities on surface runoff in the Dongjiang River basin of China. *Hydrol. Process.* 24, 1487–1495.
66. Liu W., Wei X., Liu S., Liu Y., Fan H., Zhang M., Yin J., Zhan M., 2014. How do climate and forest changes affect long-term streamflow dynamics? A case study in the upper reach of Poyang River basin. *Ecohydrology* 8(1):46–57.
67. Los S. O., Justice C. O. y Tucker C. J.. 1994. A global 1 by 1 degree NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 15:3493- 3518.
68. Los, S. O., Collatz G.J., Sellers P.J., Malmström N.H., Pollack N.H., DeFries R.S., Bounoua L., Parris M. T., Tucker C. J., y Dazlich D.A., 2000. A global 9-year biophysical land-surface data set from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology* 1:183-199.
69. Mann H. B., 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245-259.
70. Mao D., Cherkauer K.A., 2009. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region *Journal of Hydrology*, 374 (1-2), 71-82.
71. Mitchell T.D., Carter T.R., Jones P.D., Hulme M., New M., 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901 –2000) and 16 scenarios (2001 – 2100). Tyndall Working Paper 55, Tyndall Centre, UEA, Norwich, UK.
72. Mitchell T.D. y Jones P.D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25 693 – 712.
73. Mu Q., Heinsch F. A., Zhao M. y Running S. W., 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 111, 519–536.
74. Mu Q., Zhao M. y Running S.W., 2011: Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing Environ.*, 115, 1781–1800.
75. New M., Hulme M., Jones P.D., 1999: Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate* 12, 829-856.

76. New M., Hulme M. y Jones P.D., 2000: Representing twentieth century space-time climate variability. Part 2: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate* 13, 2217-2238.
77. New M., Lister D., Hulme M., Makin I., 2002: A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research* 21: 1–25.
78. Nobre C.A., Sellers P.J., Shukla J., 1991. Amazonian deforestation and regional climatic change. *J. Clim.* 4: 957-988.
79. Olson D. M., Dinerstein E., Abell R., Allnutt T., Carpenter C., McClenachan L., D’Amico J., Hurley P., Kassem K., Strand H., Taye M. y Thieme M., 2000. The Global 200: A Representation Approach to Conserving the Earth’s Distinctive Ecoregions. Conservation Science Program, World Wildlife Fund-US.
80. Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D’Amico J.A., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Lamoreux J.F., Ricketts T.H., Itoua I., Wettengel W.W., Kura Y., Hedao P., Kassem K., 2001. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *BioScience* 51(11): 933-938.
81. Operador Nacional del Sistema Eléctrico del Brasil, 2012. “Série de vazões naturalizadas.” URL <http://www.ons.org.br/home/>.
82. Ouaidrari H., Saleou, N.Z.E., Vermote E. F., Townshend J.R., Goward S.N., 2003 AVHRR Land Pathfinder II (ALP II) data set: evaluation and inter-comparison with other data sets. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 135-142.
83. Paluš M., Novotná D., 2006. Quasi-Biennial Oscillations extracted from the monthly NAO index and temperature records are phase-synchronized. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 13, 287–296.
84. Pereira D., Mello C., da Silva M., Monteiro Y., 2010. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in mantiqueira range region, MG. *CERNE*, 16(1), 32-40.
85. Peixoto C., Câmara G., Martins M., Sanglade L., Ayusso R., Mattiazzi P., 2000. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. *Sci. agric.*, vol.57, n.1, 89-96. ISSN 1678-992X
86. Pielke R.A., Avissar R., Raupach M., Dolman A.J., Zeng X., Denning S., 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Glob. Change Biol.* 4, 461–475.
87. Plaut G. y Vautard R. 1994. Spells of low-frequency oscillation and weather regimes in the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 51: 210–236.

88. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Informe Regional Selva Misionera, Préstamo BIRF 4085-AR. <http://www.ambiente.gov.ar/default.asp?IdArticulo=3978>.
89. Saurral R. I., Barros V.R. y Lettenmaier, D.P., 2008. Land use impact on the Uruguay river discharge. *Geophysical Research Letters*, 35(12).
90. Schnepf R.D., Dphlman E. y Bolling C., 2001. Agricultural in Brazil and Argentina: Developments and prospects for major field crops, ERS Agriculture and Trade Report No. WRSO13, 85.
91. Sellers, P. J. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 1994, 15, 3519-3545.
92. Shukla J., Nobre C.A., Sellers P., 1990. Amazonia deforestation and climate change. *Science*, 247, 1322–1325.
93. Silveira, L y Alonso, J. 2009. Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay Universidad de la República, Faculty of Engineering, Institute of Fluid Mechanics and Environmental Engineering, J. Herrera y Reissig 565, C.P. 11200 Montevideo, Uruguay.
94. Siriwardena L., Finlayson B.L. y McMahon T.A., 2006. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 326: 199-214.
95. Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Pax-Lenney M., Macomber S.A., 2001 Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects?. *Remote Sensing of Environment* 2001, 75, 230-244.
96. Sörensson A.A., Menendez C.G., Samuelsson P., Willen U. y Hansson U., 2010. Soil-precipitation feedbacks during the South American Monsoon as simulated by a regional climate model. *C. Change*. 98: 429-447.
97. Tucci C.E.M. y Clarke R.T., 1998. Environmental issues in the la Plata Basin. *Water Resources Development*, 14, 157-173.
98. Tucker, C. J., Pinzon J. E., y Brown M. E., 2004. Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Satellite Drift Corrected and NOAA-16 incorporated Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Monthly 1981. University of Maryland, Department of Geography.
99. UNESCO-WWAP (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-World Water Assessment Program), 2007. The La Plata basin case study (Final Report), 516.

[http://www.unesco.org/water/wwap/case\\_studies/la\\_plata/151252e\\_rev.pdf](http://www.unesco.org/water/wwap/case_studies/la_plata/151252e_rev.pdf)

100. Vassolo, S., *Uso sostenible del sistema acuífero Guaraní en el sector oriental del Paraguay (Sustainable use of the Guarani Aquifer System in the Paraguayan Eastern sector)*, Final Report Project Sistema Acuífero Guaraní in cooperation with Environment Secretary (SEAM), Asunción, Paraguay, 2007.
101. Vautard R., 1995 Patterns in time: SSA and MSSA. In: von Storch H, Navarra A (eds) Chapter 14 of analysis of climate variability: applications of statistical techniques. Springer Verlag, Berlin, 327.
102. Vautard R. y M. Ghil, 1989. Singular spectrum analysis in non-linear dynamics with applications to paleoclimatic time series. *Physica D* 35, 395-424.
103. Vautard R., Yiou P. y Ghil M. 1992. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals, *Physica D*, 58, 95-126.
104. Verdin K.L., 2011. ISLSCP II HYDRO1k Elevation-derived Products. In Hall, Forrest G., G. Collatz, B. Meeson, S. Los, E. Brown de Colstoun, y D. Landis (eds.). ISLSCP Initiative II Collection. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov/>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAC/1007
105. Von Storch H., Zwiers F.W., 1999. *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 484.
106. Weiss J.L., Gutzler D.S., Allred J.E., Dahm C.N., 2004. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA *J. Arid Environ.*, 58., 249–272.
107. Wilk J., Andersson L., Plermkamon V., 2001. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand. *Hydrol. Process.* 15, 2729– 2748.
108. Zarco-Tejada PJ, Rueda CA, Ustin SL., 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sens. Environ.* 2003;85:109–124.
109. Zhang Y., Chen X., Su S., Wu J., Qi J., 2009, Making the Best Use of Landsat MSS Images for Land Use/Cover Change Analysis, *Environmental Science and Information Application Technology*, ESIAT 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology.
110. Zhang T., Zhang X., Xia D., Liu Y., 2014. An analysis of land use change dynamics and its impacts on hydrological processes in the Jialing River Basin. *Water (Switzerland)*, 6 (12), 3758-3782.





## Anexo 1 Análisis Espectral Singular (SSA)

El Análisis Espectral Singular (SSA por sus siglas en inglés) es una potente técnica capaz de identificar y aislar modos temporales de variabilidad de series temporales relativamente cortas (Vautard,1992). EL SSA es un método estadístico relacionado con el Análisis por Componentes Principales (ACP), pero a diferencia de este último el SSA se aplica en el dominio temporal. El objetivo de la SSA es la descomposición de una serie discreta y finita en componentes aditivos que son series independientes e identificables (Vautard and Ghill, 1989; Ghill and Vautard, 1991; Vautard, 1995, Golyandina et al., 2001).

El ACP, es una técnica del análisis multivariante que permite obtener los patrones dominantes de las variaciones simultáneas de un campo o variable. ACP se ha convertido en un método estándar en la investigación del clima y los detalles, al respecto se puede encontrar en textos tales Jackson (1991) o Von Storch y Zwiers (1999). Este método ha sido ampliamente usado como herramienta en el estudio de la variabilidad espacial y temporal de campos físicos.

En estos casos se determina la *matriz de datos* ( $W$ ) (Ec 1), como la medición simultánea de cierta magnitud (temperatura, precipitación, presión atmosférica, etc.) en diferentes localidades, que denominaremos  $X_1, X_2, \dots, X_p$  siendo  $i = 1, 2, \dots, p$ . Las mediciones se realizan a iguales intervalos de tiempo  $\Delta t$ , es decir a los instantes  $t_1, t_2, t_3, \dots$ ; siendo  $j = 1, 2, \dots, n$  donde  $t_2 = t_1 + \Delta t, t_3 = t_2 + \Delta t, \text{ etc.}$

Entonces tenemos que para un tiempo  $t_j$  el conjunto de mediciones  $x_{ij}$  con  $i = 1, \dots, p$  representa la distribución espacial de la magnitud en el instante  $j$ . Entonces tenemos que nuestra matriz  $W$  esta formada por las localidades como variables y los valores temporales como individuos siendo las dimensiones de la matriz  $W(n \times p)$

$$\begin{array}{l}
 W = \left[ \begin{array}{cccc}
 x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\
 x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np}
 \end{array} \right] \begin{array}{l}
 \rightarrow \text{mapa al tiempo } t_1 \\
 \rightarrow \text{mapa al tiempo } t_2 \\
 \rightarrow \dots \\
 \rightarrow \text{mapa al tiempo } t_n
 \end{array} \\
 \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \downarrow \\
 \text{Serie temporal para la localidad } X_1 \quad \text{Serie temporal para la localidad } X_p
 \end{array} \qquad \text{Ec 1}$$

La *distancia* que consideraremos entre los individuos(tiempo)  $w_i$  y  $w_j$  es la euclidea en  $R^p$ , que en general puede definirse como:

$$d(w_i, w_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} \qquad \text{Ec 2}$$

La relación entre las variables(localidades) puede medirse a través de la Covarianza o de la Correlación, para lo cual definiremos previamente la media muestral (la media de cada localidad) como:

$$\bar{X}_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ik}}{n} \qquad (k=1, \dots, p) \qquad \text{Ec 3}$$

y el *vector de medias muestrales* es:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{X}_p \end{bmatrix} \qquad \text{Ec 4}$$

Se define entonces la *covarianza* entre las variables  $X_k$  y  $X_m$  :

$$\boxed{Cov(X_k, X_m) = s_{km} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{X}_k)(x_{im} - \bar{X}_m)}{n-1}} \quad (k, m=1, \dots, p) \quad \text{Ec 5}$$

La correspondiente *matriz de covarianza* es:

$$\boxed{S = \begin{bmatrix} s_{11}^2 & s_{12} & \dots & s_{1p} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{p1} & s_{p2} & \dots & s_{pp}^2 \end{bmatrix}} \quad \text{donde } s_i^2 = s_{ii} \text{ (varianza de la variable } X_i) \quad \text{Ec 6}$$

La *correlación* es definida como:

$$\boxed{Corr(X_k, X_m) = \rho_{km} = \frac{s_{km}}{\sqrt{s_{kk}s_{mm}}} = Cov(Z_k, Z_m)} \quad \text{Ec 7}$$

donde  $Z_k$  es la *variable estandarizada*, cuyos *individuos* se definen como

$$\boxed{z_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{X}_k}{\sqrt{s_{kk}}}} \quad \text{Ec 8}$$

Se define la *matriz de correlación*, de acuerdo a

$$\boxed{R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1p} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{p1} & \rho_{p2} & \dots & \rho_{pp} \end{bmatrix}} \quad \text{Ec 9}$$

Es necesario notar que  $R$  es una *matriz simétrica*.

El método del *ACP* está basado en una herramienta del álgebra matricial denominada la *descomposición canónica* de una matriz tal como  $S$  ó  $R$ . Por definición tanto  $S$  como  $R$  son matrices *cuadradas* (de dimensión  $p \times p$ ), *simétricas* (es decir  $s_{ik} = s_{ki}$ , de acuerdo a Ec 5 y Ec 7), *no singular*, que pueden ser reducidas a una *matriz diagonal*  $\Delta$ , premultiplicando y postmultiplicando las mismas por una matriz  $P$  (*matriz de autovectores*).

$$\boxed{P^t S P = \Delta_1 \quad \text{o} \quad P^t R P = \Delta_2} \quad \text{Ec 10}$$

donde  $P^t$  denota la matriz traspuesta de  $P$ .

La matriz de covarianzas  $S$  (o la matriz de correlación  $R$ ) es el punto de partida del *ACP*. Según la definición de  $S$  (Ec 6), para  $p$ -variables,  $s_i^2$  es la *varianza* de la  $i$ -ésima variable  $X_i$  y  $s_{ij}$  es la *covarianza* entre las variables  $X_i$  y  $X_j$  de la matriz de datos  $W$ . Si la covarianza no es nula, esto está indicando que existe cierta relación lineal entre ambas variables. La magnitud de dicha relación está representada por el *coeficiente de correlación*  $\rho_{ij}$ .

La rotación de los ejes principales transforma las  $p$ -variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , *correlacionadas entre sí*, en un conjunto de  $p$ -nuevas variables *no correlacionadas*,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_p$ . Los ejes coordenados de las nuevas variables están descritos por los autovectores  $\vec{u}_i$ , que forman la matriz  $P$  de cosenos directores utilizados en la transformación ( $Y = WP$ ). Se puede comprobar (cosa que no haremos aquí) que tal rotación, cuando  $P$  es la matriz de autovectores de  $S$ , produce los máximos autovalores  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, p$ ).

Definición 1: Llamamos *Primera Componente Principal* a la variable  $Y_1$ , que es la *combinación lineal* de las  $X_i$  y que tiene varianza máxima Propiedad:  $\text{Var}(Y_1) = \lambda_1$

En segundo lugar, queremos hallar otra dirección, ortogonal a  $\vec{u}_1$ , de forma tal que los individuos  $w$  proyectados sobre ella tengan varianza residual máxima. La condición de ortogonalidad se impone para asegurar que las proyecciones sobre  $\vec{u}_1$  y sobre la nueva dirección no estén correlacionadas.

Definición 2: Llamamos Segunda Componente Principal a la variable  $Y_2$ , que es la combinación lineal de las  $X_i$ , no correlacionada con  $Y_1$ , y que posee varianza residual máxima.

Propiedad: a)  $\text{Var}(Y_2) = \lambda_2$  como  $\lambda_1 \geq \lambda_2$  entonces  $\text{Var}(Y_1) \geq \text{Var}(Y_2)$ .

$$\text{b) Cov}(Y_1, Y_2) = 0$$

Si repetimos el procedimiento buscando una tercera, cuarta, quinta,....., dirección ortogonal a las anteriormente definidas, y que tenga una varianza residual máxima, se puede comprobar

que las direcciones que cumplen estas condiciones son las de  $\vec{u}_3, \vec{u}_4, \vec{u}_5, \dots$

Definición 3: Llamamos I-ésima Componente Principal a la variable  $Y_i$ , que es la combinación lineal de las  $X_i$ , no correlacionada con las  $Y_j$  ( $j < i$ ), que tiene varianza residual máxima. Propiedad:

$$\text{a) Var}(Y_i) = \lambda_i \text{ con } \text{Var}(Y_1) \geq \text{Var}(Y_2) \geq \dots \geq \text{Var}(Y_i)$$

$$\text{b) Cov}(Y_i, Y_j) = 0 \text{ si } i \neq j, \quad i, j = 1, 2, \dots, p$$

Como se había señalado el SSA es un método estadístico relacionado con el Análisis por Componentes Principales (ACP) pero a diferencia de este último el SSA se aplica en el dominio temporal. El objetivo es describir la variabilidad de una serie temporal,  $X_s'' = X''(s\Delta t)$  con  $s=1,2,\dots, N$  y  $\Delta t$  el intervalo de tiempo.

Con la serie temporal normalizada,  $X_s = X(s\Delta t)$ , podemos definir una *matriz de autocovarianzas desplazada en el tiempo*,  $C(M \times M)$ , que definiremos como:

$$C_{ij} = \frac{1}{N - |i - j|} \sum_{s=1}^{N - |i - j|} X_s X_{s + |i - j|} \quad (i, j = 1, \dots, M) \quad \text{Ec 11}$$

donde  $M$  es la *dimensión del espacio-temporal (embedding dimension)* sobre el cual se define la *autocovarianza*. El valor  $\tau = M \Delta t$  representa el *máximo retardo (máximo lag)*. El nombre de *autocovarianza* deriva del hecho que la *covarianza* no es calculada para diferentes series (como en el caso del *ACP*), sino sobre los términos de una única serie, según la (

Ec 11), en un intervalo de longitud  $M$  que denominaremos *ancho de ventana*. En otras palabras, no estamos comparando una serie con otra, por el contrario realizamos un análisis del comportamiento entre distintas porciones, de longitudes  $M$ , de una misma serie.

Una forma más sencilla de ver el significado de la (

Ec 11) es suponer como ocurría en el *ACP*, que tenemos una matriz de datos de la forma (Ec 1), donde cada columna representa la misma serie temporal pero desplazada en el tiempo. Utilizando la notación  $X(t) = X_s = X(s\Delta t) = X(\Delta t), X(2\Delta t), \dots, X(N\Delta t)$ , construimos la matriz equivalente a la ( Ec 1)

$$W = \begin{bmatrix} \begin{array}{c} \text{Serie temporal} \\ \downarrow \\ X(1\Delta t) \\ X(2\Delta t) \\ X(3\Delta t) \\ \dots \dots \dots \\ X((N - M)\Delta t) \\ \downarrow \\ X_s = X(s\Delta t)(N - M) \\ (s = 1, \dots, N - M) \end{array} & \begin{array}{c} \text{Serie temporal} \\ \downarrow \\ X(2\Delta t) \\ X(3\Delta t) \\ X(4\Delta t) \\ \dots \dots \dots \\ X((N - M + 1)\Delta t) \\ \downarrow \\ X_s = X(s\Delta t) \\ (s = 2, \dots, N - M) \end{array} & \begin{array}{c} \text{Serie temporal} \\ \downarrow \\ X(M\Delta t) \\ X((M + 1)\Delta t) \\ X((M + 2)\Delta t) \\ \dots \dots \dots \\ X(N\Delta t) \\ \downarrow \\ X_s = X(s\Delta t) \\ (s = M, \dots, N) \end{array} \end{bmatrix}$$

Ahora calculamos las covarianzas de acuerdo a la (Ec 5) (en este caso autocovarianzas), para terminar formando una matriz de covarianzas (en este caso matriz de autocovarianzas) como en (Ec 1). Cada elemento de la matriz de autocovarianzas así formada coincidirá con el calculado por ( Ec 11).

Es decir, que podemos realizar sobre ellas un análisis equivalente al ACP, como hiciéramos con las matrices S o R. La descomposición en autovalores de la matriz de autocovarianzas ( Ec 11) (o autocorrelación, pues los términos e la serie fueron previamente normalizados desplazada en el tiempo, produce componentes principales temporales, que denominaremos T-PCs, para diferenciarlas de las espaciales (S-PC)s obtenidas en un ACP y los correspondientes autovectores temporales T-EOFs. Tal como en el caso del ACP, cada elemento de la matriz original de datos puede ser reconstruida de acuerdo a la (Ec 5), en base a las componentes principales y autovectores. En este caso particular, la serie temporal original ( $X_s = X(s\Delta t)$ ) puede ser reconstruida en la forma:

$$X_s = X(s\Delta t) = A \sum_{k=1}^M \sum_{i+j=s} [(T-PC)_k(i)][(T-EOF)_k(i)] \quad \text{Ec 12}$$

donde el valor de la constante A es generalmente (1/M) excepto cerca del principio y fin de la serie, como veremos a continuación.

Dado que tanto los autovectores como las componentes son series temporales, podemos interpretar que SSA desarrolla un conjunto de filtros autoadaptados a los datos de la serie; de forma tal que en la (

Ec 12) podemos hacer la siguiente interpretación:

$X_s = X(s\Delta t)$  es el  $(s = i + j)$  i-ésimo valor de la serie

$(T-EOF)_k(j)$  es el j-ésimo elemento del filtro k-ésimo

$(T-PC)_k(j)$  es la amplitud de la señal capturada por el k-ésimo filtro

El índice “ i ” denota un momento en el tiempo, mientras que el índice “ j “ corresponde a un retardo (lag) respecto al tiempo “ i “. Es por este motivo que M recibe también el nombre de ancho de ventana de los filtros.

De acuerdo a Plaut y Vautard (1994), la ecuación (

Ec 11 ) puede ser escrita como:

$$X(s\Delta t) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i+j=s} [(T - PC)_k(i)] [(T - EOF)_k(j)] \quad \text{Ec 13}$$

cuando  $M \leq i \leq N-M+1$

$$X(s\Delta t) = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^M \sum_{i+j=s} [(T - PC)_k(i)] [(T - EOF)_k(j)] \quad \text{Ec 14}$$

cuando  $1 \leq i \leq M-1$

$$X(s\Delta t) = \frac{1}{N-i+1} \sum_{k=1}^M \sum_{i+j=s} [(T - PC)_k(i)] [(T - EOF)_k(j)] \quad \text{Ec 15}$$

cuando  $N-M+2 \leq i \leq N$

La descomposición en T – PCs dada las (Ec 13, Ec 14 y Ec 15) nos permite identificar más claramente los diferentes procesos ocultos en la señal  $X(s \Delta t)$  . Las primeras componentes T–PCs estarán naturalmente asociadas a mecanismos determinísticos, que explican la mayor parte de la varianza total de la serie. Las restantes T–PCs corresponderán a información que no puede ser separada del ruido de fondo.

Los T-EOFs y autovalores  $\lambda_s$  , satisfacen la ecuación:

$$\lambda_k = [(T - EOF)_k(j)] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_{ij} [(T - EOF)_k(i)] \quad \text{Ec 16}$$

donde  $C_{ij}$  es el valor autocovarianza para el lag  $|j - i|$  dada por (

Ec 11).



Uno de los resultados más destacables del SSA es que, aunque teóricamente la condición de estacionariedad está implícita en dicho análisis, el SSA se aplica muy bien en presencia de no-estacionariedades de largo período como tendencias.

Es necesario destacar que pares de autovalores muy próximos (casi iguales) están asociados con oscilaciones en la señal  $X(s \Delta t)$ . Vautard and Ghil (1989) muestran que para una señal sinusoidal (exclusivamente periódica), con frecuencia angular  $\omega$ , los únicos autovalores distintos de cero serán:

$$\lambda^S = \frac{\sigma_x^2}{2} \left( 1 + \frac{\sin 2\omega\tau}{2\omega\tau} \right) \quad \text{Ec 17}$$

$$\lambda^A = \frac{\sigma_x^2}{2} \left( 1 - \frac{\sin 2\omega\tau}{2\omega\tau} \right)$$

donde  $\sigma_x^2$  es la varianza de la señal  $\tau = \Delta t$  = ancho de la ventana. Los autovectores correspondientes estarán dados por

$$(T - EOF)^S = \alpha_1 \cos \omega t \quad \text{par} \quad \text{Ec 18}$$

$$(T - EOF)^A = \alpha_2 \sin \omega t \quad \text{impar}$$

Con  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  = constantes

## Anexo 2: Datos de P y Q (anuales) utilizados en la tesis

Año	P Subcuenca P4 (mm)	P Subcuenca Oeste (mm)	P Cuenca Iguazu (mm)	P Paranamanema (mm)	P P3 BAAPA (mm)
1901	1464,36	1457,4	1479	1295,76	1397,04
1902	1709,64	1698,36	1747,92	1406,16	1504,44
1903	1488	1428,12	1553,28	1230,84	1384,8
1904	1800,48	1775,64	1810,44	1416,96	1531,68
1905	1440,84	1513,68	1411,68	1156,56	1332,12
1906	1385,4	1351,44	1434,24	1172,76	1328,04
1907	1564,8	1594,08	1527,24	1254,24	1419,12
1908	1419,96	1418,28	1435,08	1338,6	1429,2
1909	1592,64	1677,24	1556,4	1414,44	1470,72
1910	1490,16	1436,64	1545,96	1324,8	1416,48
1911	1744,32	1700,16	1786,08	1440,6	1525,92
1912	1360,56	1426,68	1310,04	1251,6	1369,56
1913	1731,6	1785,24	1701,12	1245,48	1417,08
1914	1811,88	1810,2	1830,6	1331,88	1475,64
1915	1295,64	1353,36	1251	1189,44	1331,76
1916	1293,36	1231,08	1365	1356,84	1393,92
1917	1596,24	1506,24	1680,96	1348,08	1455,48
1918	1519,44	1631,64	1423,68	1160,4	1367,52
1919	1739,4	1827,24	1668,48	1296,12	1458,72
1920	1612,32	1634,16	1609,32	1192,92	1386,72
1921	1740,24	1765,56	1729,32	1284,96	1452,36
1922	1550,52	1510,8	1609,68	1195,56	1368,36
1923	1397,04	1473,24	1337,52	1094,04	1308,48
1924	1192,44	1221,48	1173,6	1087,8	1257,96
1925	1744,8	1640,28	1839,12	1276,2	1456,68
1926	1464,24	1443,72	1511,28	1392	1444,92
1927	1798,56	1810,56	1809,36	1470	1528,32
1928	1669,2	1648,2	1704,12	1468,92	1523,76
1929	1658,76	1739,76	1604,28	1309,68	1448,04
1930	1530	1465,2	1596,84	1357,32	1445,52
1931	1680,36	1674,36	1701,84	1454,52	1508,16
1932	1219,08	1228,92	1224,96	1262,28	1343,16
1933	1332,72	1374,96	1325,76	1247,64	1354,8
1934	1498,2	1468,8	1538,52	1377,12	1437,84
1935	1803,72	1830,84	1785	1317,24	1478,88
1936	1498,68	1477,92	1537,08	1344,6	1431,24
1937	1810,56	1779,6	1840,08	1375,92	1502,16
1938	1632	1611,6	1662	1354,32	1461,84
1939	1984,8	2155,56	1844,28	1275,24	1501,92
1940	1804,08	1903,92	1726,08	1297,92	1381,68

Año	P Subcuenca P4 (mm)	P Subcuenca Oeste (mm)	P Cuenca Iguazu (mm)	P Paranamanema (mm)	P P3 BAAPA (mm)
1941	1665,36	1686,96	1643,4	1432,68	1519,56
1942	1417,8	1479,24	1387,08	1169,52	1264,68
1943	1200,6	1136,76	1264,44	1341,96	1440,48
1944	1307,4	1280,52	1353,72	1307,04	1353,24
1945	1772,52	1742,04	1799,04	1533,24	1617,96
1946	1926,12	1989,6	1889,64	1538,04	1646,4
1947	1586,88	1457,52	1703,76	1416,84	1410,72
1948	1371,72	1391,28	1361,4	1161	1229,4
1949	1564,32	1653,6	1480,8	1315,56	1477,44
1950	1460,64	1422,96	1513,32	1488	1465,92
1951	1465,32	1478,4	1456,44	1041,24	1248,6
1952	1451,4	1384,56	1510,32	1191	1272,6
1953	2202	2350,44	2091,24	1512,12	1752,24
1954	2018,28	2049	2024,4	1283,52	1500,84
1955	1640,28	1755,24	1576,56	1505,52	1645,8
1956	1536,48	1431	1635,84	1292,52	1381,68
1957	1536,24	1513,92	1556,16	1453,2	1522,92
1958	1736,52	1901,04	1593,12	1418,52	1522,32
1959	1486,8	1583,28	1426,44	1484,64	1488,24
1960	1578,24	1670,76	1481,4	1475,76	1531,44
1961	1549,32	1522,92	1593,6	1295,88	1365,24
1962	1429,2	1455,96	1426,08	1279,44	1414,8
1963	1783,32	1808,28	1788,36	1402,92	1484,64
1964	1753,32	1772,4	1781,4	1785,84	1733,4
1965	1887	1936,56	1869	1542,24	1603,92
1966	1533,48	1423,8	1634,28	1470,24	1397,28
1967	1101,48	1046,64	1150,44	1126,92	1102,8
1968	1726,08	1802,4	1696,56	1193,4	1301,52
1969	1509,96	1423,56	1583,16	1465,8	1494,72
1970	1917,96	1908,12	1942,32	1510,68	1649,04
1971	1565,88	1488,24	1656,24	1548,84	1517,28
1972	2065,92	2039,4	2091,72	1630,32	1748,04
1973	1586,4	1613,64	1577,76	1474,32	1550,4
1974	1512,72	1589,76	1435,68	1254,96	1351,8
1975	1690,2	1514,04	1848,72	1596,24	1579,32
1976	1458	1386,36	1516,92	1503,48	1527,72
1977	1235,04	1178,28	1306,56	1167,48	1165,92
1978	1544,28	1605,6	1500,96	1137,84	1289,64
1979	1895,76	1843,92	1948,2	1603,92	1692,12

Año	P Subcuenca P4 (mm)	P Subcuenca Oeste (mm)	P Cuenca Iguazu (mm)	P Paranamanema (mm)	P P3 BAAPA (mm)
1980	1369,92	1328,64	1416,96	1107,72	1252,2
1981	1669,56	1625,28	1726,56	1563,96	1631,04
1982	2619,84	2707,2	2528,28	1965,96	2170,2
1983	1801,92	1733,16	1896,6	1302,36	1471,68
1984	1549,68	1691,28	1401,84	1267,68	1357,32
1985	1492,8	1568,88	1443,6	1126,08	1250,88
1986	1735,8	2007,24	1504,68	1345,08	1481,28
1987	1350	1357,2	1368,48	1202,28	1304,52
1988	1649,28	1653,36	1652,28	1329,48	1481,76
1989	2044,08	2002,32	2120,76	1438,44	1568,76
1990	1545	1577,76	1534,92	1280,64	1371,6
1991	1977	2036,52	1937,04	1485,24	1716,6
1992	1523,64	1493,64	1568,04	1477,8	1461
1993	1897,08	1838,16	1958,16	1495,8	1570,2
1994	1694,04	1662,48	1734,6	1493,76	1492,8
1995	1541,28	1417,32	1632,36	1425,48	1496,52
1996	2194,2	2218,08	2233,2	1655,76	1824,48
1997	2601,12	2590,56	2632,56	1767,48	1939,92
1998	1692,84	1616,28	1763,76	1430,76	1518
1999	1524,12	1535,76	1534,08	1118,64	1255,32
2000	1907,64	1758,24	2036,52	1502,52	1577,52
2001	1545,24	1533,36	1528,92	1402,2	1418,04
2002	1778,04	1746,6	1806	1320,48	1421,16
2003	1672,32	1694,88	1671,48	1298,28	1436,76
2004	1594,8	1531,92	1635,84	1302,48	1324,56
2005	1263,84	1209	1310,28	1247,52	1325,88
2006	1853,4	1929,12	1799,52	1544,64	1633,8
2007	1643,4	1581,48	1718,52	1450,68	1539,24
2008	1651,56	1608,96	1710,24	1400,88	1440,6

Año	Q Subcuenca P4 (mm)	Q Subcuenca P4 Oeste (mm)	Q Salto Caxias (mm)	Q Subcuenca P3 BAAPA (mm)	Q Cuenca Ñacunday (mm)	Q Rosana (mm)
1931	981,35		824,45	347,65		442,68
1932	583,21		415,27	306,25		467,76
1933	499,92		341,92	176,91		249,12
1934	548,49		408,03	180,67		199,20
1935	1190,87		1053,19	361,57		411,84
1936	633,70		509,98	325,33		299,16
1937	1035,66		919,42	297,93		492,24
1938	607,38		450,19	213,53		327,12
1939	935,41		615,95	272,61		288,72
1940	872,02		579,54	218,48	655,01	232,32
1941	964,76		734,96	428,66	626,60	361,08
1942	528,56	621,86	378,11	217,13	397,24	390,12
1943	422,70	366,70	349,91	187,14	291,69	256,20
1944	341,31	276,76	292,73	149,87	331,28	191,88
1945	818,43	640,32	777,25	356,14	632,49	231,48
1946	712,13	619,99	682,68	328,23	768,11	440,28
1947	538,31	313,74	727,27	291,67	401,79	423,72
1948	499,84	546,94	447,98	146,77	417,99	317,52
1949	499,39	571,55	408,25	160,04	516,02	156,00
1950	564,76	516,54	521,03	235,08	493,43	294,84
1951	536,46	686,51	389,60	135,51	452,82	332,04
1952	658,89	800,37	512,45	170,25	731,98	226,08
1953	1113,37	1230,16	897,10	322,43	1114,90	270,60
1954	1034,21	993,28	873,64	191,56	729,57	437,64
1955	876,22	1100,88	592,44	311,14	711,20	289,68
1956	758,85	707,07	769,70	245,99	630,04	389,52
1957	744,94	770,18	693,95	324,91	447,99	561,36
1958	717,70	801,75	579,80	275,53	566,09	354,84
1959	418,23	464,30	367,24	226,65	493,60	287,64
1960	575,11	500,02	627,18	328,41	582,83	319,68
1961	598,56	561,15	617,01	204,45	500,30	354,60
1962	447,61	395,92	495,13	265,02	449,52	258,24
1963	704,05	696,59	699,25	257,81	598,20	369,48
1964	724,18	681,95	682,95	383,22	762,43	304,44
1965	967,76	971,77	867,67	367,18	935,84	606,84
1966	538,81	437,77	668,50	249,41	404,18	376,20
1967	297,09	266,91	311,56	190,39	399,34	290,52
1968	716,25	612,55	669,34	187,28	853,49	223,80
1969	529,35	381,71	607,11	235,82	469,25	260,52
1970	859,72	561,82	958,57	476,26	744,20	376,80
1971	472,55	136,59	589,35	367,50	572,28	429,60
1972	1020,69	709,68	1072,06	551,40	936,90	673,20

Año	Q Subcuenca P4 (mm)	Q Subcuenca P4 Oeste (mm)	Q Salto Caxias (mm)	Q Subcuenca P3 BAAPA (mm)	Q Cuenca Ñacunday (mm)	Q Rosana (mm)
1973	696,40	451,21	751,05	426,01	606,60	544,44
1974	572,70	572,39	463,40	314,40	620,50	546,36
1975	723,29	345,46	961,18	427,76	502,08	467,76
1976	460,56	276,39	595,23	494,79	201,01	658,32
1977	307,04	169,71	410,41	201,50	242,63	478,56
1978	413,40	269,37	510,86	160,61	420,72	335,16
1979	639,58	488,01	903,38	366,35	736,22	319,44
1980	503,57	246,28	679,94	326,31	538,46	479,52
1981	494,89	209,89	725,11	311,65	637,09	348,00
1982	1326,52	448,50	1945,70	959,70	1591,91	604,56
1983	667,31	364,24	932,37	583,93	1167,46	1039,08
1984	696,05	739,61	575,38	375,27	949,31	362,88
1985	544,42	647,02	409,00	366,65	777,28	296,64
1986	863,05	872,43	888,75	321,24	1225,59	328,44
1987	638,57	660,25	569,95	348,93	797,58	488,64
1988	626,27	648,59	619,27	409,25	712,53	333,00
1989	1098,94	957,26	1170,30	575,77	1426,42	485,64
1990	884,84	1003,40	728,91	413,44	1111,42	629,04
1991	1046,53	1081,95	992,03	521,65	1176,26	389,04
1992	831,20	857,49	733,33	503,97	881,25	516,12
1993	1041,59	1128,00	911,91	459,06	952,25	533,28
1994	1100,67	1357,12	819,90	421,56	1126,45	354,00
1995	809,99	796,22	845,31	506,67	736,49	511,08
1996	1255,88	1376,96	1096,36	472,17	1380,28	447,84
1997	1806,81	1925,29	1587,52	756,95	1454,29	681,36
1998	1132,17	1218,67	1076,17	591,67	1122,39	701,16
1999	615,27	698,51	526,24	277,12	675,92	467,40
2000	1074,84	1144,22	1062,43	467,62	1245,94	373,44
2001	816,49	907,16	671,72	201,78	1007,21	454,56
2002	873,02	954,92	757,76	367,93	969,07	401,28
2003	683,42	755,89	627,26	306,38	1003,06	410,28
2004	760,12	845,58	661,78	364,27	721,50	425,04
2005	731,23	723,41	646,80	320,14	646,88	430,08
2006	852,24	1038,58	680,79	237,44	997,41	282,60
2007	544,07	505,72	615,19	340,46	728,49	385,32
2008	556,65	482,97	645,89	351,57	758,82	383,52

## Anexo 3 Comparación datos de precipitación CRU y estaciones meteorológicas

Se compararon los valores obtenidos de la base de datos CRU con los datos de 4 estaciones meteorológicas (Brasilia, Londrina, Sao Paulo y Encarnación). Se comparó la serie de la celda CRU correspondiente a la ubicación de la estación meteorológica. En la Fig. A-1 se observa la grilla de CRU y la ubicación de las estaciones seleccionadas.

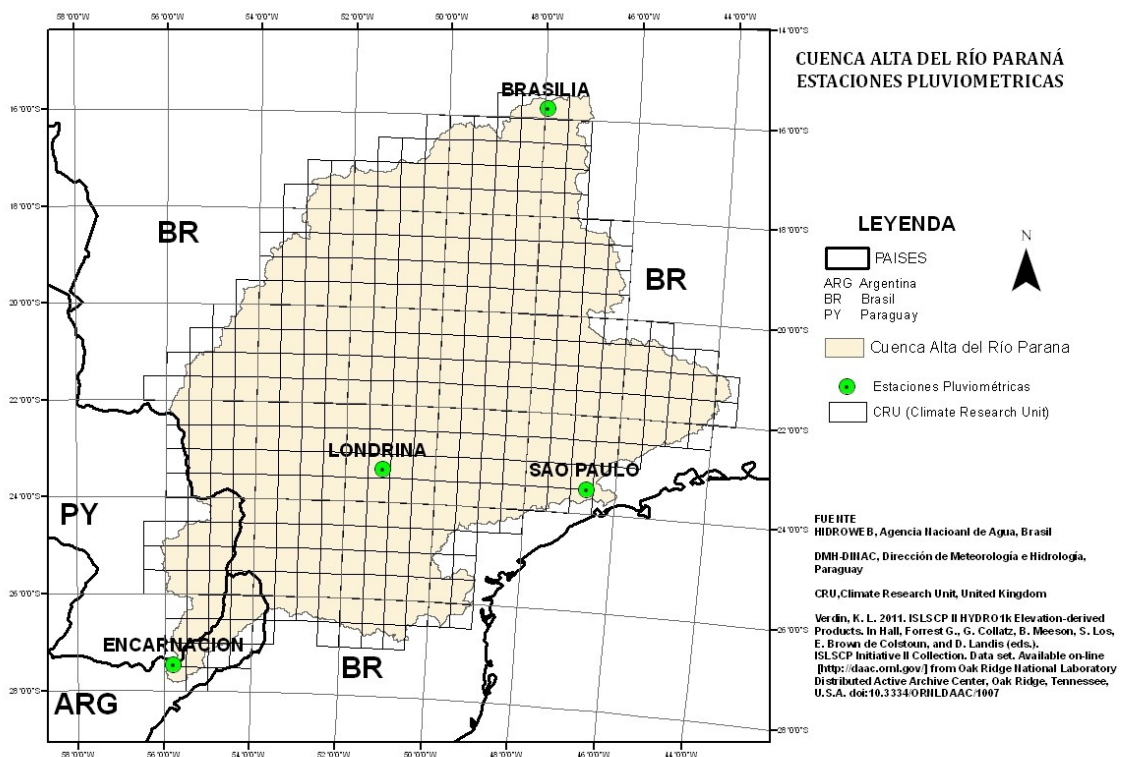


Fig. A-1: Grilla de CRU para la Cuenca Alta del Río Paraná y las estaciones meteorológicas utilizadas para comparar con los datos de CRU

En la Fig. A-2 se observa la comparación de los datos anuales de las estaciones meteorológicas con la serie obtenida de la celda en la base CRU. Además para cada estación se realizó el análisis de consistencia doblemente acumulado. En Fig. A-3 se observa que los datos CRU para las estaciones Brasilia y Encarnación presentan una consistencia del 98% y las Estaciones Londrina y Sao Paulo presentan una consistencia del orden de 92%. Así se

verificó que los datos CRU son confiables para utilizarlos en la determinación de las series de P en la Cuenca del Plata.

Para determinar la serie de la precipitación media en cada cuenca o área de estudio, se establecieron las celdas de CRU que corresponden a cada cuenca. Con estas celdas se calculo la media aritmética de los valores de precipitación (o variable climatológica) de cada mes y con esto se obtiene la serie de P medias mensuales de la cuenca.

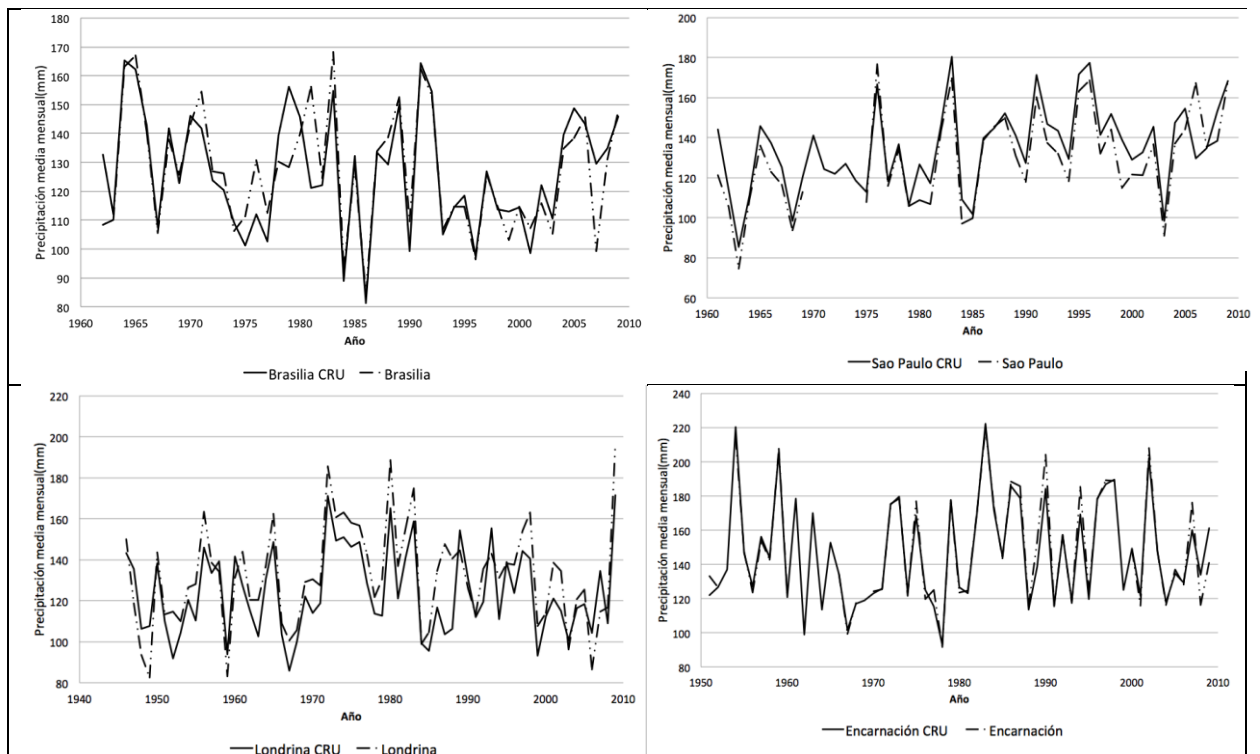
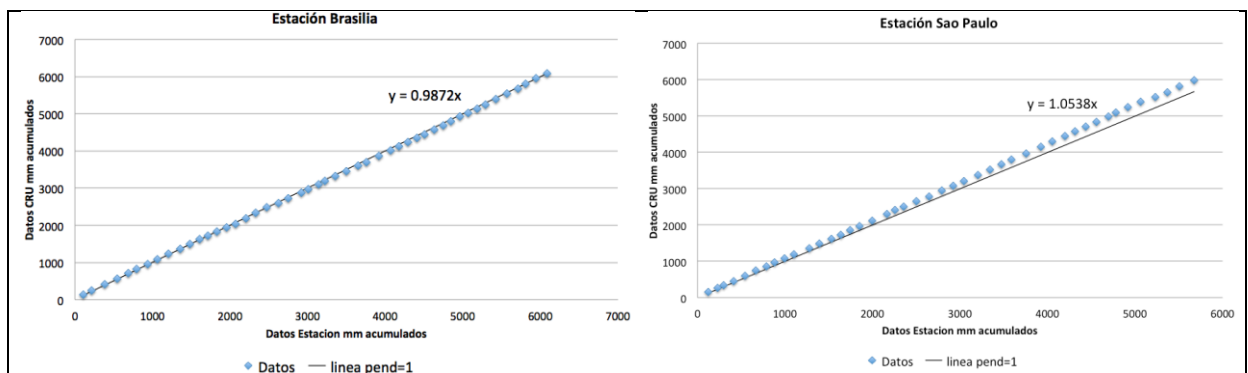


Fig. A-2: Comparación datos anuales de estaciones meteorológicas con serie de datos CRU (línea continua serie CRU y línea punteada serie de la estación meteorológica)





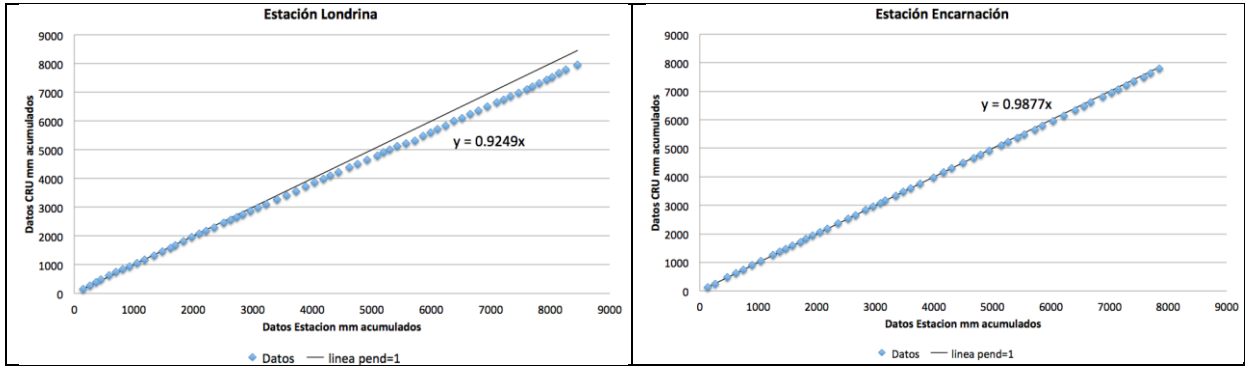
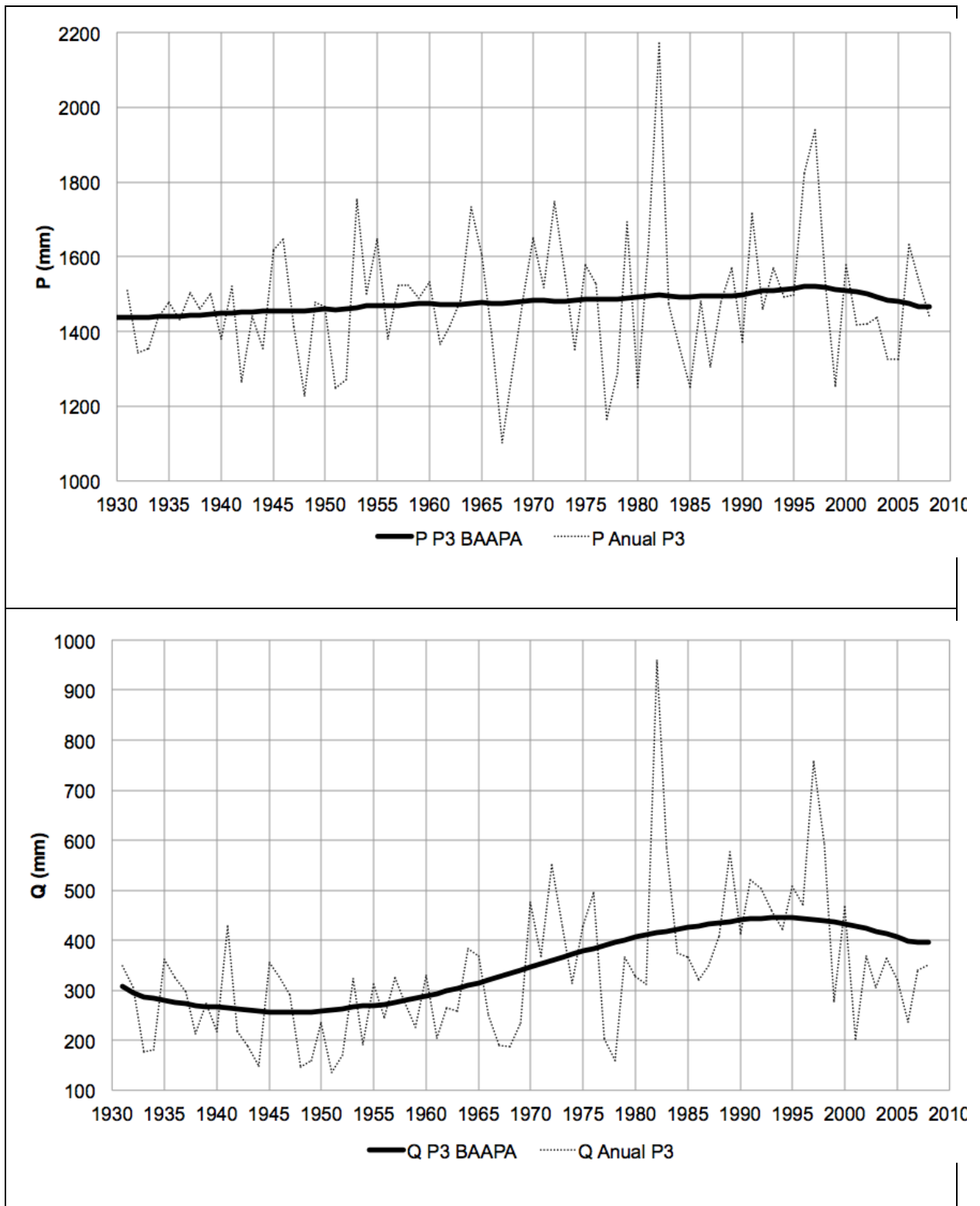
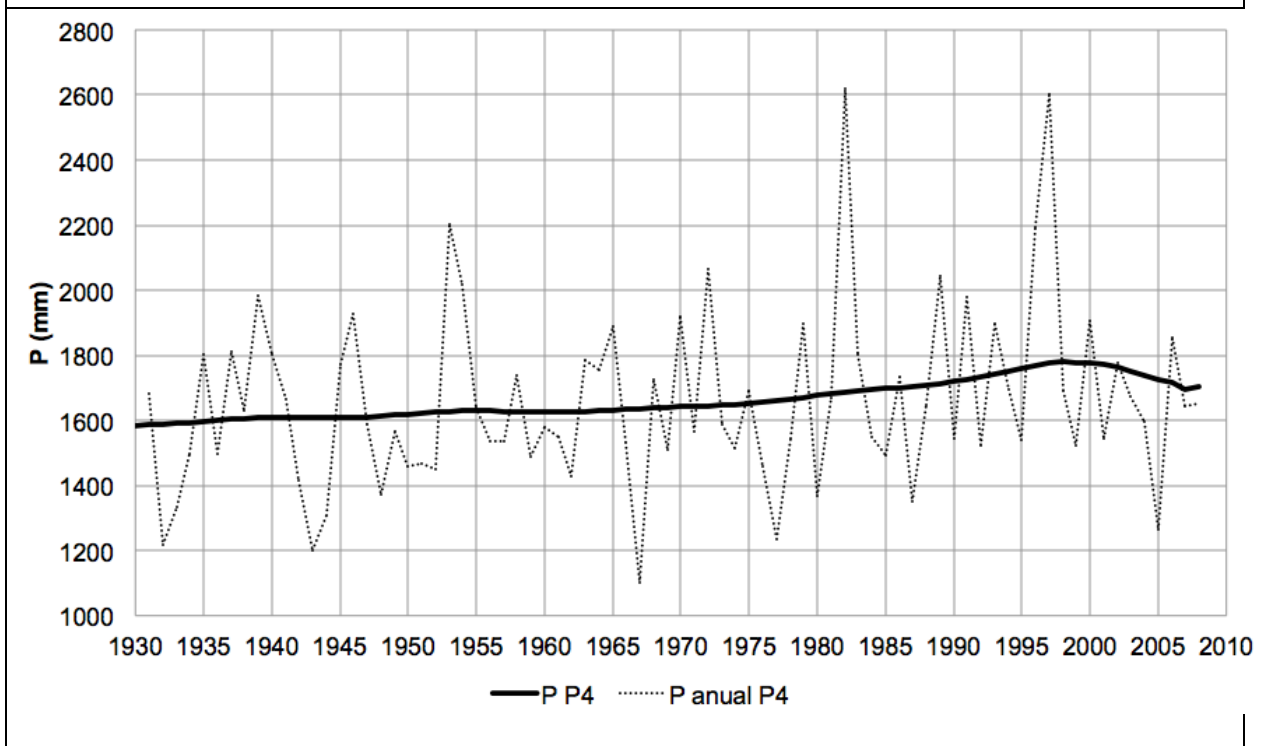
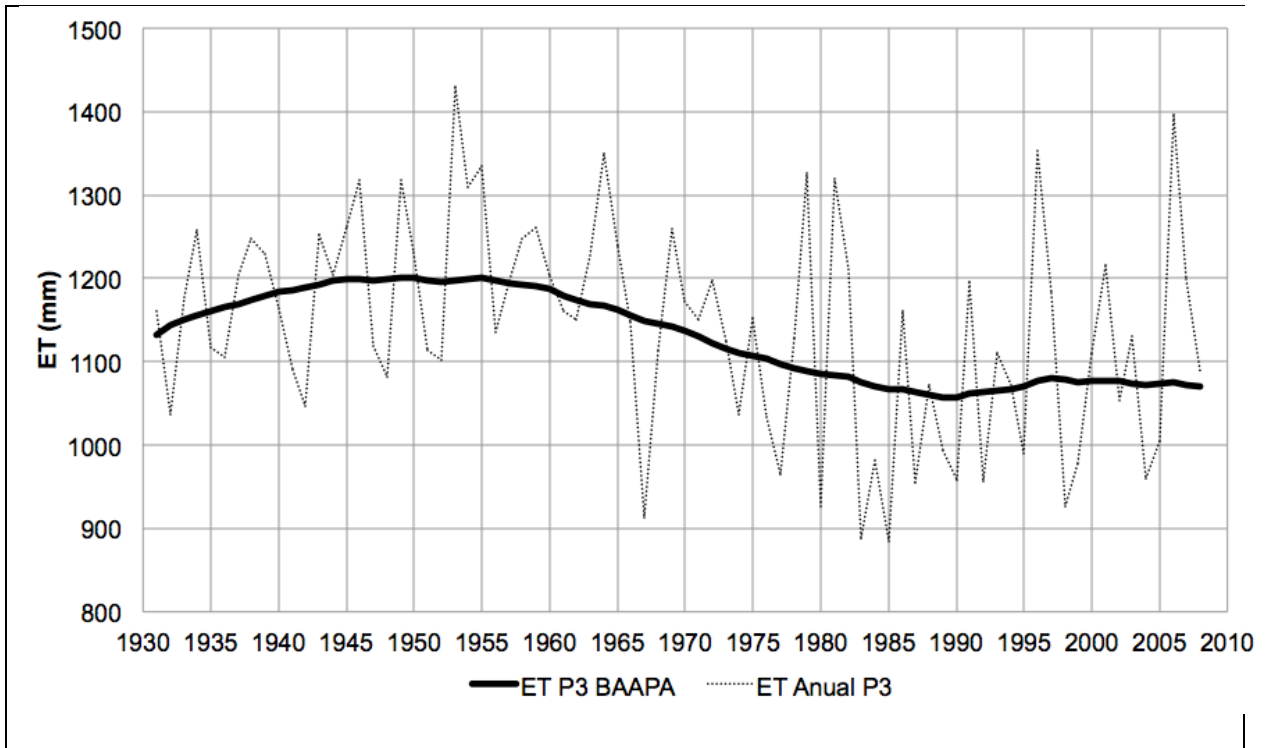
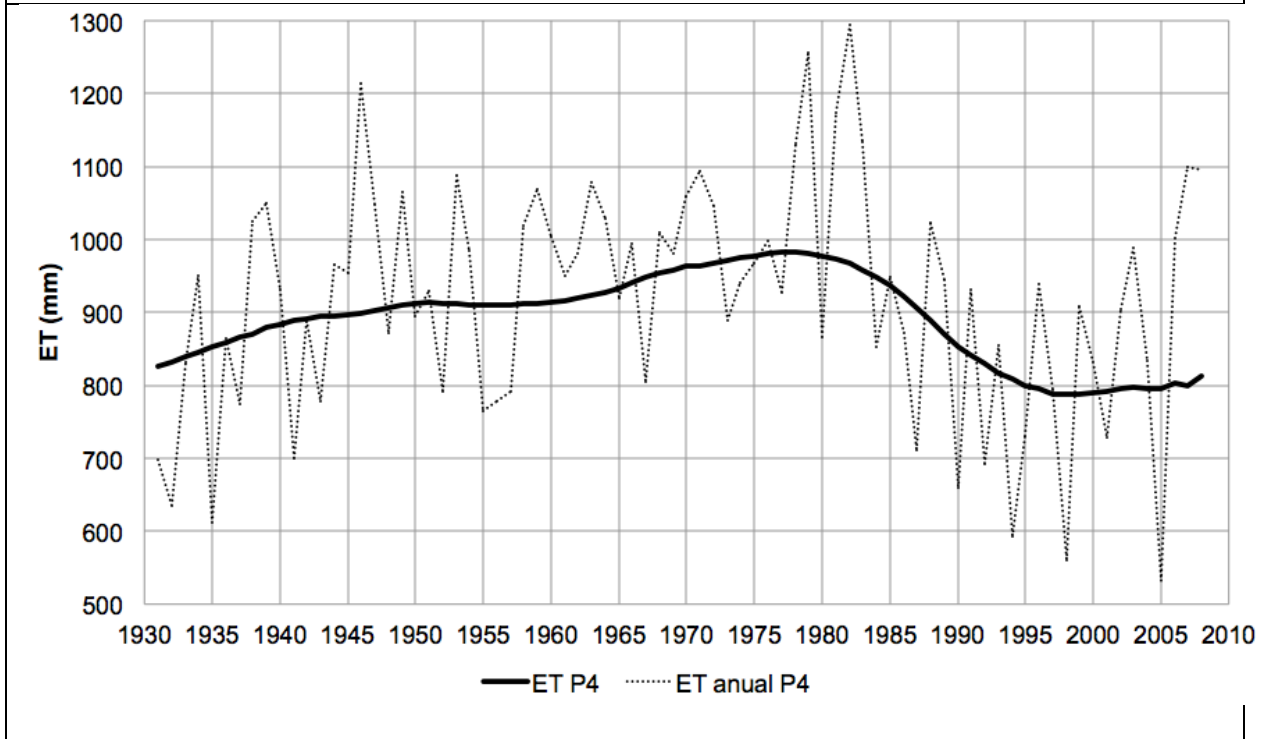
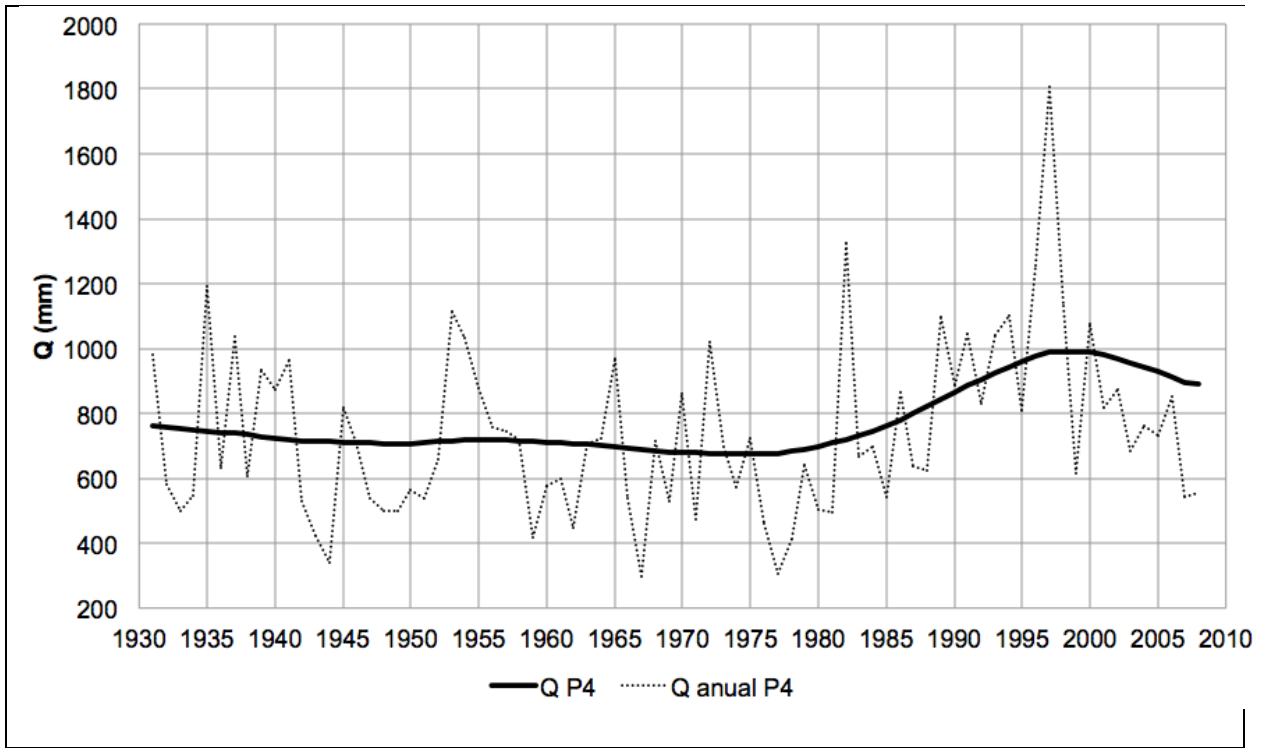


Fig. A-3: Análisis doblemente acumulado de cada estación con la serie correspondiente de CRU

## Anexo 4: Gráficos datos medidos y reconstrucción señal de baja frecuencia de las Subcuencas P3 BAAPA y P4.







**Doctorado en Ingeniería**  
**mención recursos hídricos**

Título de la obra:

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

Autor: Andrés Wehrle Martínez

Lugar: Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

Bosque Atlántico, cuenca del Plata, río Paraná  
cambios de uso de suelo, análisis singular espectral  
balance hídrico,