

CONCENTRACIÓN DIARIA DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL IGUAZÚ, PARANÁ, BRASIL.

MARQUES PINHEIRO, Gabriela⁽¹⁾; TEIXEIRA NERY, Jonas⁽²⁾; y MARTÍN-VIDE, Javier⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. ⁽²⁾ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Ourinhos-SP, Brasil. ⁽³⁾ Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona, España

gabimpinheiro20@hotmail.com, jonas@ourinhos.unesp.br, jmartinvide@ub.edu

RESUMEN

La cuenca del Río Iguazu/Paraná, en el sur de Brasil, está expuesta a los riesgos derivados de las inundaciones, sobre todo en los meses de verano (diciembre, enero y febrero). Durante este período la cuenca experimenta precipitaciones convectivas asociadas a sistemas frontales junto con el calentamiento local. Además, la precipitación convectiva está vinculada a la entrada de humedad procedente del norte de Brasil. Dada su concentración en el tiempo y su gran volumen total, el conocimiento de la precipitación a resolución diaria en la cuenca es muy importante. En particular, la comprensión de los patrones de precipitación diaria es esencial para la planificación y gestión del territorio y en cuanto a la conservación de los recursos naturales. Con base en el conocimiento de la zona, este trabajo utiliza el índice de concentración diaria (CI) y el índice de concentración de la precipitación (PCI) para determinar los impactos potenciales de la precipitación diaria. Los índices se aplicaron a 24 estaciones meteorológicas de toda la cuenca con datos de calidad, para el período 1970-2010. Los valores del índice de concentración (CI) son moderados, no superando 0,60, lo que significa que las cantidades diarias de lluvia están relativamente bien distribuidas.

Palabras clave: Cuenca Rio Iguazu, precipitación, variabilidad, índice de concentración.

ABSTRACT

The Iguazu/Paraná basin, located in the South of Brazil, is exposed to flood risk, mainly during summer months (December, January and February). During this period, the basin undergoes convective precipitation associated with frontal systems with local heating. Besides that, the convective precipitation is related to the moisture entrance from the North of Brazil. Given its concentration at time and large total volume, the knowledge of the resolution of daily rainfall is very important. Particularly, the comprehension of the daily rainfall patterns is essential for planning and management of land and to the conservation of natural resources. Based on area knowledge, this paper uses the daily concentration index (CI) and the standardization concentration index (PCI) to determine the potential impacts of daily rainfall. The ratio was administrated in 24 weather stations throughout the basin with quality data for the period 1970-2010. The values of daily concentration index (CI) are moderate, nor superior to 0,60, which means that the daily rain is relatively well distributed.

Key words: Rio Iguazu basin, rainfall, variability, concentration index.

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes ciudades tienden a concentrar cada vez a un mayor número de personas. Ya más del 50% de la población planetaria es urbana, según Naciones Unidas, lo que genera graves problemas sociales y ambientales de todas las clases. Los riesgos y vulnerabilidades a los problemas medioambientales urbanos tienden a intensificarse por lo que es necesario desarrollar estudios que permitan abordarlos y resolverlos, así como, en el contexto del cambio climático, adoptar las acciones de adaptación más adecuadas ante las crecientes inundaciones urbanas.

Los fenómenos meteorológicos extremos de precipitación están entre los desastres naturales más graves que afectan a la sociedad. Los regímenes de lluvias, además de su variabilidad natural, son afectados por las transformaciones de la superficie y los cambios en los usos del suelo, a diferentes escalas, desde la local a la global.

Los fenómenos relacionados con oscilaciones del flujo de agua, como episodios de inundaciones y riadas, son constantes en Brasil, principalmente en las grandes ciudades del sur y sureste del país. Las inundaciones representaron un escenario crítico entre los años de 1974 a 2003 y el mayor número de desastres naturales entre 1948 y 2007, según datos de EM-DAT (emergencia eventos Database).

La cuenca del río Iguazu ubicado en la región sur de Brasil, se inserta en este contexto y constituye parte del escenario descrito. El área de la cuenca se encuentra entre las latitudes 25° 05' S y 26° 45' S y longitudes 48° 57' W y 54° 50' W, y es la más grande en el estado de Paraná, con 70.800 km², de la cual el 80.4% se encuentra en Paraná, 16,5% en Santa Catarina y 3% en Argentina. Su eje principal tiene una longitud de 1.275 km, en dirección este-oeste, y, según Köppen, la cuenca del río Iguazú presenta clima subtropical húmedo, con veranos cálidos e inviernos frescos, sin estación seca. Los niveles altos y constantes de precipitación favorecen la agricultura, base económica de la región y dan lugar a un gran potencial hidroeléctrico, también favorecido por la complejidad de la formación geológica que conforma la cuenca (COPEL, 1996).

Las más importantes ciudades ubicadas en la cuenca son: Curitiba, São José dos Pinhais, Colombo, Cascavel, Guarapuava, Araucaria y Francisco Beltrão. La población de la cuenca se estima en 4.541.698 habitantes, de los cuales el 85,3% corresponde a población urbana. En las cabeceras de la cuenca, donde se encuentra el área metropolitana de Curitiba, hay una gran concentración de población, con industrias, actividades comerciales y servicios. Dentro de la agricultura, los cultivos de soja y trigo son los más destacados, existiendo todavía pastos (Suderhsa, 1997).

Un fenómeno que interfiere en las características climáticas de las circulaciones de gran escala de la atmósfera y en particular de América del Sur, es El Niño/Oscilación Sur (ENOS). Como es sabido, la circulación en el Pacífico Tropical austral, de aguas frías al este de este océano, está sometida a fluctuaciones recurrentes con notables calentamientos episódicos, en periodos de 3 a 7 años, que provocan cambios en la circulación a gran escala de la atmósfera en la citada área (Oscilación del Sur), causando anomalías climáticas en gran parte del globo (Hoskin y Karoly 1981 y otros). Las intensidades y las fases de la Oscilación del Sur han sido generalmente medidas a través de los llamados índices de la Oscilación del Sur (IOS o SOi), que se derivan de la presión atmosférica en superficie en las cercanías de los centros de acción (el anticiclón tropical del Pacífico sur y las bajas presiones ecuatoriales del nordeste de Australia). Entre éstos, el índice basado en las diferencias de las presiones atmosféricas al nivel del mar (mensuales y estacionales) estandarizadas de Tahití (Polinesia francesa) y Darwin (nordeste de Australia), que es negativo para los episodios cálidos o de El Niño, ha

sido promocionado como un gran indicador del estado de la Oscilación del Sur (Trenberth, 1983). El área de estudio presenta una mayor cantidad de lluvia durante la fase de El Niño.

Según Hoffmann (1975), los frentes fríos son la principal causa de las lluvias en el sur de Brasil. Debido a su variabilidad espacial y temporal, la precipitación es compleja y variable. Responde, como se ha dicho, a la influencia de los eventos ENOS y, además, a los sistemas frontales originarios de América del Sur, a través del calentamiento local y el aporte de humedad, y aún más por la orografía (Cordillera de los Andes). También tenemos un importante sistema denominado de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), influenciando la lluvia en la primavera y verano en el hemisferio sur.

El presente trabajo intenta analizar los patrones temporales de la precipitación diaria utilizando el índice de concentración diaria de la precipitación (CI), desarrollado por Martín-Vide (2003), y el PCI desarrollado por Oliver (1980) y modificado por De Luis *et al* (1997). Estos índices se calcularon para entender las variaciones de las precipitaciones en diferentes escalas de tiempo. Reflejan la concentración temporal de la precipitación, que representa el potencial de causar inundaciones, con sus efectos en los recursos hídricos y la seguridad en la ingeniería hidráulica.



Fig 1: Ubicación de la cuenca del Río Iguazú, entre los estados de Paraná y Santa Catarina, al sur de Brasil.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El periodo de estudio seleccionado para este trabajo, corresponde a 30 años lineares (1980-2010)). Para tanto fueron seleccionados datos de 24 estaciones pluviométricas de la red de la Agência Nacional de Água (ANA). Todos los datos fueron homogeneizados y consistidos, a través del paquete Climatol (Guijarro, 2014), y posteriormente se empleó el método del CI propuesto por Martín-Vide (2003), utilizando el paquete “*Precintcon*” idealizado por Povoia (2013).

Los dos paquetes anteriores son desarrollados en ambiente R. Con los resultados alcanzados fueron confeccionados los mapas, usando el software “*Surfer 10*”, para observar la distribución espacio-temporal del índice en toda la cuenca.

Además, el uso del R en el análisis y manipulación de datos constituye un valioso instrumento, especialmente en estudios climáticos. Para Nery (2012), el programa presenta un abanico de opciones de exámenes estadísticos, como testes paramétricos y no paramétricos, modelaje lineal y no lineal, diagnóstico de series temporales, simulaciones y estadísticas espaciales o descriptivas.

La heterogeneidad de la precipitación mensual se analizó mediante el índice de concentración de la precipitación, originalmente propuesto por Oliver (1980) y modificado luego por De Luis *et al* (1997), y el coeficiente de variación.

El índice modificado se expresa como:

$$PCI = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} p_i)^2}$$

Según lo descrito por Oliver (1980), los valores anuales de PCI por debajo de 10 indican una distribución uniforme de la precipitación mensual, mientras que los valores de 11-20 denotan estacionalidad en la distribución de las lluvias. Valores superiores a 20 corresponden a un clima con marcada variabilidad mensual en la cantidad de precipitación.

Otro índice, a resolución diaria, llamado índice de concentración diaria (CI), propuesto por Martín-Vide (2003), se utilizó para determinar el peso de las lluvias según sus diferentes clases de precipitación.

El Índice de Concentración (CI) se define como una aproximación al índice de Gini, representación numérica de las desigualdades mostradas por la curva de Lorenz, que sirve para expresar el grado de concentración de una magnitud concreta en una porción de una población determinada. En este caso, el CI sirve para cuantificar la importancia de los días lluviosos respecto al total de lluvia acumulada en una serie temporal.

Así, para determinar el impacto relativo de las diferentes clases de precipitación diaria, y, especialmente, para evaluar el peso de las mayores cantidades diarias recogidas respecto del total, este índice analiza los porcentajes acumulados de precipitación Y , al que contribuye el porcentaje acumulado de días X en los cuales tuvo lugar.

Estos porcentajes se asocian a curvas exponenciales, del tipo:

$$Y = aX \exp(bX)$$

Los valores de a y b son constantes y se determinan de la siguiente manera:

$$\ln a = \frac{\sum X_i^2 \sum \ln Y_i + \sum X_i \sum X_i \ln X_i - \sum X_i^2 \sum \ln X_i - \sum X_i \sum X_i \ln Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$b = \frac{N \sum X_i \ln Y_i + \sum X_i \sum \ln X_i - N \sum X_i \ln X_i - \sum X_i \sum \ln Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

Una vez que las constantes han sido determinadas, la integral definitiva de la curva exponencial entre 0 y 100 es el área A bajo la curva:

$$A = \int_0^{100} \frac{a}{b} e^{bx} \left(x - \frac{1}{b}\right) dx$$

El área S' comprimida por la curva, la línea de equidistribución y $X=100$ es la diferencia entre 5000 y el valor de la ecuación del valor de A :

$$S' = 5000 - A$$

A partir de este valor, se define el índice de concentración de la precipitación diaria:

$$CI = \frac{2S'}{10000} = \frac{S'}{5000}$$

El análisis utilizando el CI proporciona mejor comprensión y permite observar la ocurrencia de inundación en una zona concreta. Sin embargo, en eventos de precipitaciones extremas están asociados al desarrollo de estos incidentes.

Número	Código	Nombre	Longitud (W)	Latitud (S)	Altitud
62	2549017	São José dos Pinhais	-49,15	-25,51	910
63	2549051	Bocaiuva do Sul	-49,11	-25,21	980
64	2549061	Quitandinha	-49,51	-25,86	820
65	2550000	Prudentópolis	-50,93	-25,21	690
66	2550015	Palmeira	-50,01	-25,31	870
67	2550028	Lapa	-50,01	-25,69	900
69	2551000	Guarapuava	-51,45	-25,45	950
70	2551022	Inácio Martins	-51,28	-25,81	872
71	2551037	Pinhão	-51,85	-25,81	1050
72	2552000	Quedas do Iguaçu	-52,91	-25,44	550
73	2552019	Laranjeiras do Sul	-52,43	-25,32	880
74	2553004	Dois vizinhos	-53,33	-25,65	450
75	2553014	Capanema	-53,98	-25,58	250
76	2553028	Capitão Leônidas Marques	-53,56	-25,41	470
77	2554002	Foz do Iguaçu	-54,43	-25,68	152
78	2554012	Foz do Iguaçu	-54,41	-25,44	284
79	2554018	Medianeira	-54,03	-25,41	400
80	2649006	Rio Negro	-49,81	-26,11	770
81	2651000	União da Vitória	-51,08	-26,22	736
82	2651020	Bituruna	-51,41	-26,15	950
83	2652012	Vitorino	-52,81	-26,26	710
84	2650000	Papanduva	-50,28	-26,37	765
85	2650005	São Matheus do Sul	-50,32	-26,01	770
86	2650006	São Matheus do Sul	-50,58	-26,32	770

Tabla 1: NÚMERO, CÓDIGO, NOMBRE, LONGITUD, LATITUD Y ALTITUD DE LAS ESTACIONES UTILIZADAS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tal y como aparece en la Fig. 2, la altitud en la cuenca del río Iguazu es bien marcada, con valores superiores a 800 m en la cabecera hasta la parte central de la cuenca. Los valores en la parte final de la cuenca no exceden los 300 m y provocan una fuerte inclinación, permitiendo la generación de energía eléctrica a lo largo de esta cuenca.

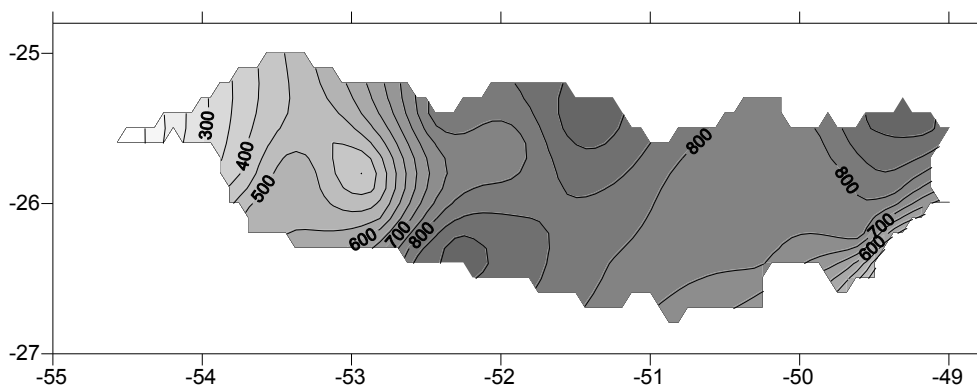


Fig. 2: Mapa de la altitud (m) de la cuenca del Río Iguazu.

En la Fig.3, las precipitaciones anuales oscilan entre 1.700 mm y 1.900 mm, donde los valores más altos se encuentran en la región de mayor altitud y pendiente, como la parte oeste de la cuenca. Otra observación importante a subrayar está en la zona central de la cuenca, en el cual se observan valores próximos a 1.800 mm de precipitación el cual está asociado a orografía de la región, el municipio de Guarapuava por ejemplo, que está a 1.200 m por encima del nivel do mar.

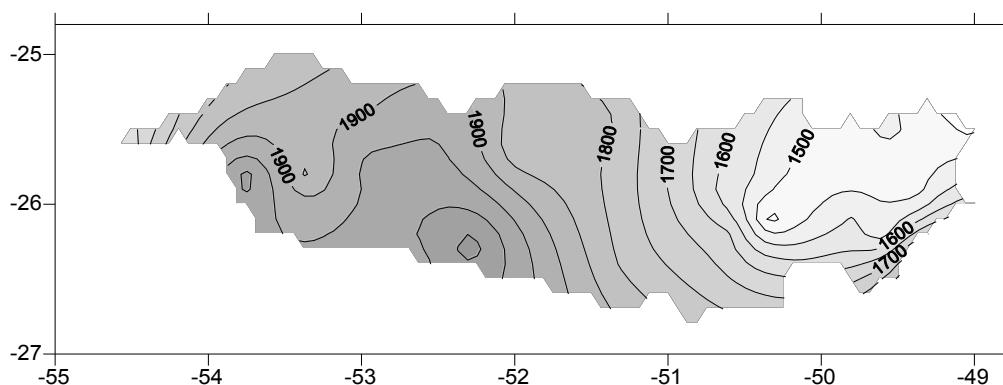


Fig. 3: Media anual de precipitación (mm) en la cuenca do Río Iguazu.

Se calcularon los valores de CV, IC y PCI para 24 estaciones ubicadas en la cuenca del Iguazu para el período 1970-2010, presentado en la Tabla 2. Martín-Vide (2003) explica que valores del CI inferiores a 0,50 se consideran con baja concentración pluviométrica, mientras para valores entre 0,50 a 0,60 son considerados moderados, entre 0,60 a 0,70 la concentración es caracterizada alta, ya para valores por encima de 0,70 se considerada muy alta.

Los datos establecidos en la Tabla 2, son entre 0,52 y 0,59, por lo tanto la concentración de la precipitación en la cuenca del Iguazu es considerada moderada, siendo el valor más pequeño de 0,52 en tres estaciones (Palmeira, Lapa y Vitorino) y el mayor valor fue de 0,59 en el municipio de São Matheus do Sul.

Número	Código	Nombre	CV	CI	PCI
62	2549017	São José dos Pinhais	0,16	0,53	11,3
63	2549051	Bocaiuva do Sul	0,22	0,53	11,3
64	2549061	Quitandinha	0,18	0,54	11,1
65	2550000	Prudentópolis	0,22	0,53	11,4
66	2550015	Palmeira	0,23	0,52	11,5
67	2550028	Lapa	0,17	0,52	11,1
69	2551000	Guarapuava	0,19	0,53	11,0
70	2551022	Inácio Martins	0,18	0,54	10,9
71	2551037	Pinhão	0,23	0,53	10,8
72	2552000	Quedas do Iguazu	0,20	0,53	11,1
73	2552019	Laranjeiras do Sul	0,18	0,55	11,2
74	2553004	Dois vizinhos	0,18	0,54	11,2
75	2553014	Capanema	0,21	0,53	11,3
76	2553028	Leônidas Marques	0,20	0,53	11,2
77	2554002	Foz do Iguazu	0,18	0,53	11,5
78	2554012	Foz do Iguazu	0,23	0,53	11,6
79	2554018	Medianeira	0,22	0,54	11,2
80	2649006	Rio Negro	0,21	0,54	11,3
81	2651000	União da Vitória	0,20	0,54	11,1
82	2651020	Bituruna	0,24	0,54	11,0
83	2652012	Vitorino	0,22	0,52	10,9
84	2650000	Papanduva	0,23	0,54	11,2
85	2650005	São Matheus do Sul	0,20	0,54	11,2
86	2650006	São Matheus do Sul	0,20	0,59	11,3

Tabla 2: NÚMERO, CÓDIGO, NOMBRE, CV, CI Y PCI DE LAS ESTACIONES UTILIZADAS.

Estos datos demuestran que la concentración de la precipitación diaria en estas áreas es regular y sin estacionalidad. La consecuencia del resultado es muy útil en estudios ambientales, cuyo objetivo es estimar el riesgo de pérdida de suelo o evaluar la intensidad de los procesos de erosión, así como estimar las zonas con inundaciones frecuentes. Los valores del CI y PCI en la Tabla 2 se representan en la Fig. 4 y 5, que permite la visualización de los patrones espaciales de concentración de la precipitación diaria.

En relación al CV y, de acuerdo Martín-Vide (2003) los valores por debajo de 0,20 se consideran bajos, entre 0,20 y 0,24 se consideran moderados, entre 0,25 y 0,29 se definen moderadamente altos, entre 0,30 y 0,34 son altos, entre 0,35 y 0,39 son alto - muy altos y valores superiores a 0,40 se consideran muy altas. Por lo tanto, cabe señalar que estos datos no tienen gran variación, siendo su valor habitual entre 0,16 y 0,24, concluyendo que para

esta cuenca, los valores del CV resultaran bajos y moderados concentraciones, así como los valores de CI.

Durante el período de análisis, la cuenca del Iguazu presentó lluvias intensas, que se produjeron por los sistemas frontales y procesos locales (calentamiento superficial) que provocaron la precipitación convectiva. Esta precipitación se asocia con la entrada de humedad, proveniente del norte de Brasil, principalmente durante la primavera y el verano. Este hecho provoca en la parte sureste de la cuenca, precisamente en el municipio de São Matheus do Sul, mayor concentración de lluvias, alcanzando un valor de CI de 0,59.

Los valores PCI varían de 10,8 (estación de Pinhão) a 11,6 (estación en Foz do Iguazu), según Oliver (1980), estos valores no denotan un sistema de lluvias estacionales. La estacionalidad es más pronunciada en las zonas de transición entre la costa y la meseta (después de la Serra do Mar). La Tabla 2 presenta los valores del PCI en cada estación y sus estadísticas estandarizadas.

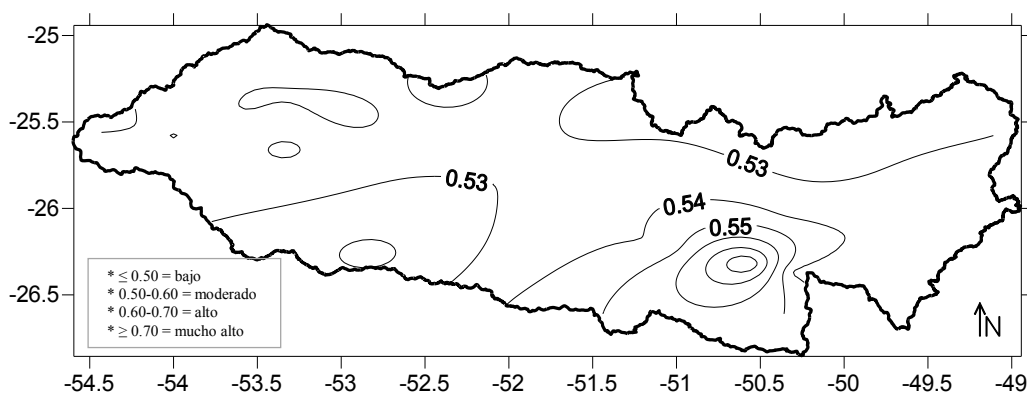


Fig. 4: Mapa del CI, período 1970-2012.

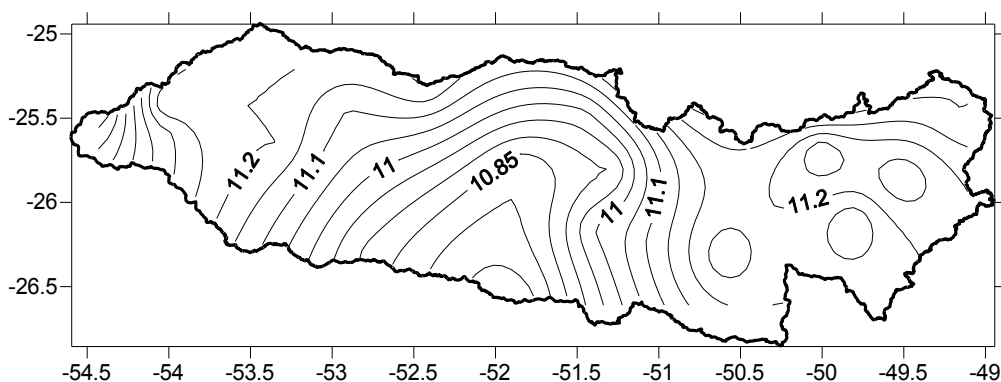


Fig. 5: Mapa del PCI, período 1970-2012.

4. CONCLUSIÓN

El índice de concentración de la precipitación (PCI, de Luis et al 1997) se utilizó para evaluar la estacionalidad de la precipitación y el índice de concentración (CI, Martín-Vide 2004) fue utilizado para determinar el peso del evento más grande para un valor total de precipitación

diaria. Los resultados del PCI mostraron una baja estacionalidad de la precipitación en la cuenca. Los valores medios más altos del PCI y CI se ubican principalmente en la parte meridional (SE) del área de estudio, y particularmente en tres estaciones, dos situadas en Matheus do Sul y una en Foz do Iguaçu. El índice de concentración de IC oscila entre 0,52 y 0,59 en la cuenca.

La cuenca del río Iguaçu está situada en la zona de transición entre la región tropical y subtropical, con veranos cálidos e inviernos frescos, sin estación seca. Además, la cuenca del río Iguaçu a menudo recibe lluvias convectivas con una precipitación total muy alta durante la primavera y el verano, elevando los valores de CI. Los resultados del estudio demuestran que el CI es generalmente proporcional al PCI, mostrando una pequeña estacionalidad en la distribución de las lluvias. Para la zona de transición climática, la concentración de las precipitaciones en algunos días lluviosos (primavera y verano) es aparentemente elevada en lugares con alta precipitación anual.

5. AGRADECIMIENTOS

Nuestros agradecimientos al Grupo de Climatología de la Universidad de Barcelona, Cataluña, España. Los dos primeros autores tienen apoyo financiero del gobierno de Brasil (PDSE, CsF-CAPES).

6. REFERENCIAS

Agência Nacional de Água - ANA (2012). <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. consultado en: 10 dez. 2012.

COPEL. (1996). *Energia elétrica no Paraná, 25 anos de evolução*. Curitiba: Copel.

De Luis, M. Gonzalez-Hidalgo, J.C. Ravento, S J. Sanches, JR. Cortina, J (1997). *Distribución espacial de la concentración y agresividad de la lluvia en el territorio de la Comunidad Valenciana*. Cuaternario y Geomorfología 11:33–44

EM DAT. Emergency Disasters Data Base. (2011). <<http://www.em-dat.net/>>. consultado en: 10 dez. 2011.

Guijarro, J. A. (2014). *User's guide to climatol. State Meteorological Agency (AEMET), Balearic Islands Office, Spain*. <<http://www.climatol.eu/index.html>> consultado en: 20.05.2014.

Hoffmann, J. A. J. (1975). *Atlas climático de América Del Sur. Primera Parte*. Ginebra: OMM.

Hoskin, B. J.; Karoly, D. (1981). *The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing*. J. Atmos. Sci. Boston, v. 38, p. 1179- 1196,

Martín-Vide, J. (2003): *El tiempo y el Clima*. Barcelona. Rubes. 128 pp.

Nery, J. T. (2012). *Análise da variabilidade da precipitação pluvial no Brasil e suas regiões*. Livre-docência. UNESP, Ourinhos-SP.

Oliver, J.E (1980) *Monthly precipitation distribution: a comparative index*. Prof Geogr 32:300–309

Povoa, L.V. (2013). “Manual do Usuário do Pacote Precinticon”. Laboratório Computacional da UNESP-Ourinhos, Brasil.

R: *A Language and Environment for Statistical Computing. Version 3.1.0* (2014-04-10)

R Development Core Team (2014). *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, <<http://www.R-project.org>> consultado em: 23/05/2014.

SUDERHSA. (1997). *Qualidade das águas interiores do Estado do Paraná 1987-1995. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos*. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento ambiental. Curitiba, 1997.

Trenberth, K. E. (1983). *Spacial and temporal variations of the Southern Oscillation*. Roy. Meteor. Soc. Quart. J., Reading, v. 102, p. 639-653, 1983.