

Imágenes TRMM para identificar patrones de precipitación e índices ENSO en Ecuador

Lenin Campozano¹, Daniela Ballari^{2,1}, Rolando Celleri¹

¹ Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Cuenca, Avenida 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador.

² Grupo de Geoinformación. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cuenca, Avenida 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: {lenin.campozano, daniela.ballari, rollando.celleri}@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

El conocimiento de patrones espacio-temporales de precipitaciones y cómo se relacionan con ENSO es fundamental para predecir el impacto espacial de eventos ENSO y desarrollar sistemas de alerta temprana. ENSO ha sido previamente estudiado en Ecuador a partir de datos de pluviómetros, sin embargo su impacto en los patrones espaciales de precipitaciones es ampliamente desconocido. El objetivo de este estudio es utilizar imágenes satelitales de la Misión de Observación de Precipitación Tropical (Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM) para identificar patrones espacio-temporales de precipitaciones en el Ecuador y su relación con índices ENSO. Los análisis se efectuaron de enero a abril (EA) por ser la temporada con más influencia de ENSO en el Ecuador. Se realizó un análisis de componentes principales sobre 16 años de imágenes TRMM. Las series temporales de los componentes se correlacionaron con la temperatura superficial del Pacífico tropical (TS Pt) de la región Niño 1+2 y con el Índice Trans Niño (Trans Niño Index - TNI). Los resultados muestran que Niño 1+2 y TNI son ambos necesarios para estimar el impacto de TS Pt en las precipitaciones de la temporada EA. Anomalías positivas del Niño 1+2 se correlacionan positivamente con las precipitaciones en las planicies de la costa ecuatoriana y negativamente con las precipitaciones en la región amazónica. Valores altos de TNI se relacionan con un incremento de las precipitaciones en todo el país.

Palabras clave: TRMM, Ecuador, ENSO, patrones espacio-temporales, precipitación, Niño1+2, TNI, ACP.

ABSTRACT

Understanding spatio-temporal precipitation patterns and how they are related to ENSO are important to predict the spatial impact of ENSO events and develop early warning systems. While ENSO has been previously studied in Ecuador using rain gauge data, its impact on the spatial rainfall pattern is largely unknown. Thus, the purpose of this study was to use the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite imagery (TRMM) to identify spatio-temporal patterns of precipitation from January to April, the season more affected by ENSO in Ecuador, and their relation with ENSO indexes. Principal component analysis was applied over the 16-year TRMM imagery, and score time series were correlated with the tropical Pacific surface sea temperature (tP SST) of Niño 1+2 region as well as with the Trans Niño Index (TNI). Results suggest that TNI and Niño 1+2 indicators are both needed to estimate the impact of tP SST on the precipitation during JA season. Strong positive anomalies on Niño 1+2 are positively correlated with higher precipitation in coastal plain of Ecuador and below average precipitation in the Amazon region. High values of TNI are directly related to an enhancement of precipitation all over the country.

Keywords: TRMM, Ecuador, ENSO, spatio-temporal pattern, precipitation, niño1+2, TNI, PCA.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los patrones espacio-temporales de precipitación y como ellos se relacionan con El Niño - Oscilación Sur (El Niño Southern Oscillation - ENSO), es fundamental para priorizar dónde y cuándo los sistemas de monitoreo y de alerta temprana deben ser reforzados (Bendix & Bendix, 2006). El efecto de ENSO en sus períodos cálidos, o en otras palabras los eventos Niño, es ampliamente conocido en el Ecuador: intensas precipitaciones, inundaciones, afectación de infraestructura, pérdidas económicas e incremento de enfermedades. Ante estos efectos catastróficos, es de vital importancia conocer qué mecanismos de seguimientos y predicción de ENSO son los más adecuados para nuestra región.

La evolución y ocurrencia de eventos ENSO es monitoreada con la ayuda de diferentes índices (Hanley *et al.*, 2003; Kiem & Franks, 2001). Algunos de ellos se basan en la presión atmosférica superficial del Océano Pacífico, este es el caso del índice de Oscilación Sur (Southern Oscillation Index - SOI). Mientras que otros índices se basan en la temperatura superficial de diferentes regiones geográficas del Océano Pacífico: la región Niño 1 se localiza frente a la costa de Perú y Ecuador; la región Niño 2 se localiza entre el Ecuador continental y Galápagos. La región Niño 3, en el Pacífico ecuatorial central; y la región Niño 4, en el Pacífico ecuatorial oeste. Además existen otros índices compuestos como es el caso del índice Trans-Niño (Trans Niño Index -TNI) que se relaciona con el gradiente de temperaturas entre el Pacífico tropical este y oeste, es decir con las regiones Niño 1+2 y Niño 4 (Trenberth & Stepaniak, 2001); y el índice multivariado ENSO (Multivariate ENSO Index - MEI) que se obtiene a partir de 6 variables relacionadas con presión a nivel del mar, vientos, temperatura superficial del mar, temperatura del aire y nubosidad (Wolter & Timlin, 1998).

Si bien no existe un acuerdo en la comunidad científica sobre cuales índices capturan de mejor forma los eventos ENSO (Hanley *et al.*, 2003), sí se conoce que los efectos ENSO pueden ser altamente variables a través de grandes áreas geográficas (Kiem & Franks, 2001). Es así que ciertos índices resultan ser más efectivos en determinadas áreas geográficas. ENSO ha sido previamente estudiado en Ecuador (Bendix & Bendix 2006; Vuille *et al.* 2000; Mora & Willems, 2012; Bendix *et al.*, 2011; Bendix *et al.*, 2003; Pineda *et al.*, 2013). Sin embargo, dichos estudios se basaron en datos de pluviómetros, que por su número limitado e interrupciones temporales, afecta la continuidad espacial y temporal de dicha información. Si bien algunos estudios se complementan con imágenes satelitales de precipitaciones mejorando así la continuidad espacio-temporal, todos ellos se realizaron para períodos temporales anteriores al año 2000 o, en su defecto, para eventos puntuales.

El objetivo de este estudio es utilizar las imágenes satelitales de la Misión de Observación de Precipitación Tropical (Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM) de los últimos 16 años (1999-2014) para identificar patrones espacio-temporales de precipitaciones en el Ecuador y su relación con índices ENSO. Los análisis se efectuaron de enero a abril (EA) por ser la temporada con más influencia de ENSO en el Ecuador (citado en Bendix & Bendix, 2006). El método se basa en el análisis de componentes principales y correlación de las series temporales de los componentes resultantes con diferentes índices ENSO.

2. MÉTODO

Las imágenes satelitales TRMM 3B43 V7 combinan estimaciones de precipitaciones de múltiples satélites pasivos, con datos de pluviómetros cuando estos estuvieran disponibles. TRMM tiene una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (aproximadamente 27 km x 27 km a la latitud de 0°), cubriendo la banda de latitud de 50°N a 50°S y de longitud 180°E a 180°E . Su resolución temporal es de 3 horas, sin embargo en pros-proceso se realizan agregaciones acumuladas a escalas diarias y mensuales. La cobertura temporal es desde enero de 1998 hasta la actualidad (Huffman *et al.*, 2007). Estas imágenes fueron descargadas de la plataforma Giovanni de la NASA (http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_Monthly).

El período temporal utilizado en este estudio es de 1999 a 2014 y a escala mensual. Excluimos las imágenes de 1998, por haber registrado un evento Niño inusualmente fuerte, el más fuerte de los últimos 16 años, produciendo en el análisis de componentes principales desarrollado para el presente estudio una acumulación predominante de varianza en dicho año, limitando así la capacidad de análisis de precipitación de años posteriores. Adicionalmente, considerando que la temporada con mayor influencia de intensas lluvias e inundaciones durante eventos Niño, corresponde a los meses de enero a abril (citado en Bendix & Bendix, 2006), que se denominará temporada EA, se acumularon las imágenes de EA, para obtener así 16 imágenes de precipitación.

El análisis de componentes principales (Principal Component Analysis - PCA) fue utilizado para transformar la colección de 16 imágenes de precipitaciones en un nuevo conjunto de variables (o componentes) que no se encuentren correlacionadas y que se ordenen de acuerdo a su posibilidad de explicar la variabilidad de la precipitación (Machado-Machado *et al.*, 2011). PCA puede ser aplicado en diferentes modos de acuerdo a como los datos de entrada son organizados (Demšar *et al.*, 2013). En nuestro caso, utilizados el modo S, que hace alusión al sentido espacial (spatial) del análisis. Este modo permite a identificar patrones espaciales así como su prevalencia en el tiempo (Machado-Machado *et al.*, 2011).

Las imágenes de entradas son ordenadas en una matriz con la componente espacial como columnas (una columna por cada pixel de la grilla de la imagen). Es decir, las variables son los pixeles. Mientras que la componente temporal es ordenada en forma de filas (una fila por cada una de las 16 imágenes). Es decir, las observaciones son las distintas temporadas de lluvias acumuladas EA. PCA se aplicó sin rotación.

PCA proporciona como resultado, para cada componente o PC, un mapa con el patrón espacial de las precipitaciones con valores de -1 a 1. Estos valores se corresponden con la correlación del componente y los valores originales. Además, proporciona una serie temporal indicando cuando dicho patrón espacial ha prevalecido en el tiempo. Finalmente, para identificar los mecanismos físicos subyacentes, se correlacionaron las series temporales de los PC con los índices ENSO Niño 1+2, Niño 3+4, SOI, TNI y MEI. Las series temporales de los índices fueron descargadas de <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>.

Los cálculos fueron realizados en R, utilizando para la gestión y procesado de las imágenes satelitales las librerías espaciales *rgdal*, *ncdf*, *sp*, *raster* y para el análisis de componentes principales la librería *psych* con la función principal.

3. RESULTADOS

Los resultados de PCA en modo S mostraron que PC1 explica el 40% de la variabilidad de las precipitaciones y PC2 el 21%. Los restantes PC explican menos del 10% de la variabilidad de la precipitación. Las Figs. 1 y 2 muestran los patrones espaciales para PC1 y PC2. PC1-EA presenta una influencia positiva en todo el país con valores superiores a 0.5. Desde la falda oeste de la cordillera hacia el este del país se observa una influencia mayor (valores > 0.6). PC2-EA, por su parte, presenta una fuerte influencia positiva en las planicies de la costa (valores > 0.6) y ligeramente negativa en las planicies de la región amazónica (valores entre -0.2 y -0.4).

Las series temporales PC1 y PC2 con los puntajes de prevalencia temporal de los patrones espaciales se incluyen en las Figs. 3 y 4. Las correlaciones con los índices Niño 1+2, Niño 3+4, SOI, TNI y MEI se muestran en la tabla 1. Como puede observarse, PC1-EA presenta una fuerte correlación con el índice TNI de $r=0.72$, (ver también Fig. 3). Esto señala la influencia macro del gradiente de temperatura en el Océano Pacífico en las precipitaciones del Ecuador. Por su parte, PC2-EA presenta una fuerte correlación con el índice Niño 1+2 de $r=0.55$, señalando la influencia inmediata de la región Niño 1+2 en las precipitaciones del país (ver también Fig. 4).

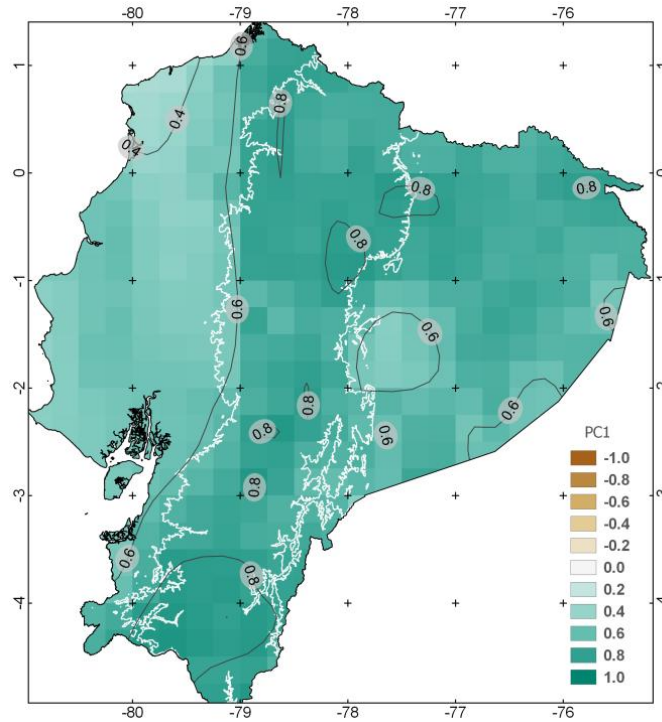


Figura 1. Patrón espacial para PC1 - Precipitación acumulada de enero a abril, período 1999 a 2014. Líneas blancas muestran las curvas de nivel de 1000m que delimitan la cordillera de las planicies de la costa y amazonia. Líneas negras muestran las líneas contornos con equidistancia 0.2 de PC1.

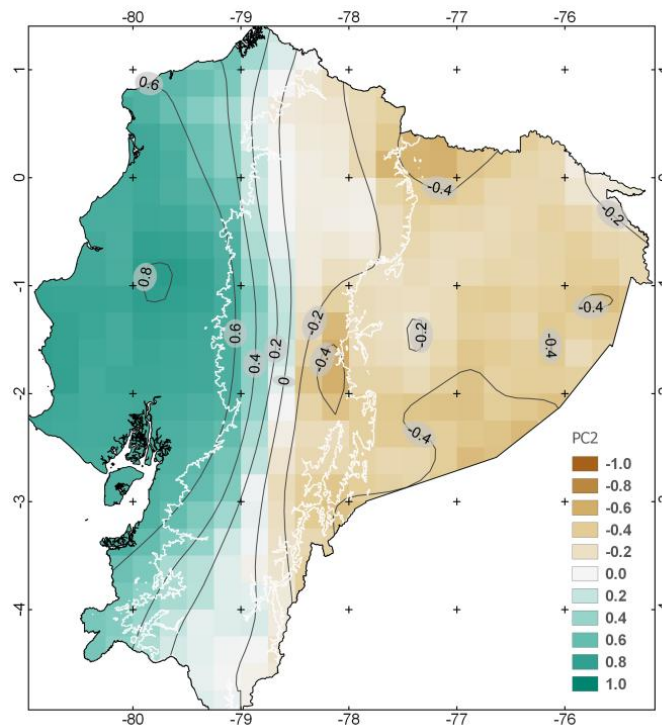


Figura 2. Patrón espacial para PC2 - Precipitación acumulada de enero a abril, período 1999 a 2014. Líneas blancas muestran las curvas de nivel de 1000m que delimitan la cordillera de las planicies de la costa y amazonia. Líneas negras muestran las líneas contornos con equidistancia 0.2 de PC2.

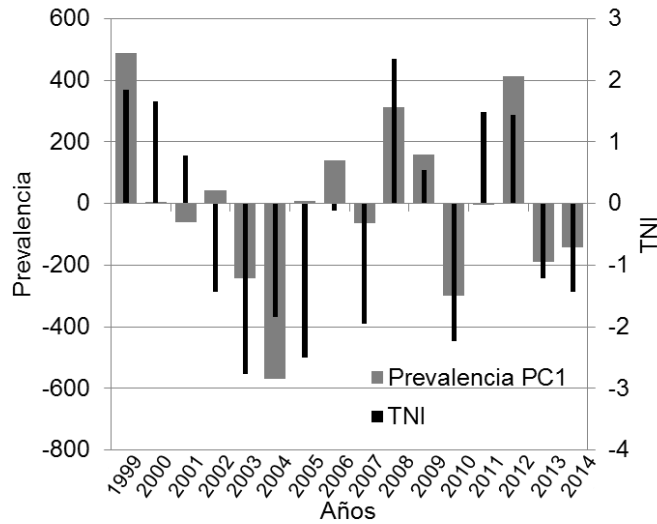


Figura 3. Patrón temporal de PC1 con precipitación acumulada de enero a abril, período 1999 a 2014. TNI con índices promedio de enero a abril.

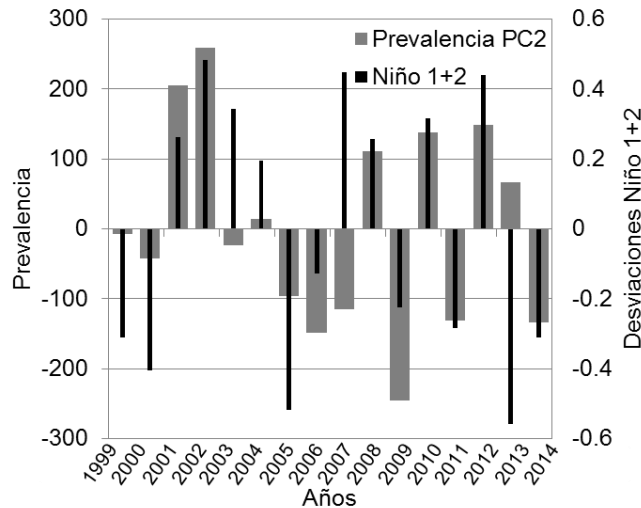


Figura 4. Patrón temporal de PC2 con precipitación acumulada de enero a abril, período 1999 a 2014. Niño 1+2 con índices promedio de enero a abril, representado a través de las desviaciones de la media.

Tabla 1. Correlaciones series temporales PC1 y PC2 con índices ENSO.

Índice/componente	PC1	PC2
Niño 1+2	-0.07	0.55
Niño 3+4	-0.62	0.16
SOI	0.54	-0.13
TNI	0.72	0.05
MEI	-0.61	0.12

Finalmente, para facilitar la interpretación conjunta de PC1 y PC2, los valores de correlación de los patrones espaciales se representan en un diagrama de dispersión, en el que aplicando kmeans se realizó una clasificación no supervisada de 3 clases. La Fig. 5a muestra las 3 clases diferenciadas por colores. Al mapear estas clases (Fig. 5b), la clase color azul (zona 1) se corresponde con la región costa, la de color marrón (zona 2) con la región sierra y la de color verde (zona 3) con la región

amazónica. Estos resultados muestran que la región costa se caracteriza por una fuerte influencia positiva de Niño 1+2 y moderada a fuerte de TNI, la zona 2 (región sierra) por una fuerte influencia TNI, aunque Niño 1+2 tiende a cero e incluso a valores ligeramente negativos. La zona 3 (región amazónica) se caracteriza una fuerte influencia positiva de TNI y ligeramente negativa de Niño 1+2. Es decir, en zona 1 (región costa) se esperan anomalías de precipitaciones positivas producto de ambos índices, Niño 1+2 y TNI. Sin embargo en la zona 2 (región sierra) mayoritariamente producto de TNI, mientras que en la zona 3 (región amazónica) se esperan anomalías positivas producto de TNI combinadas con anomalías negativas de Niño 1+2.

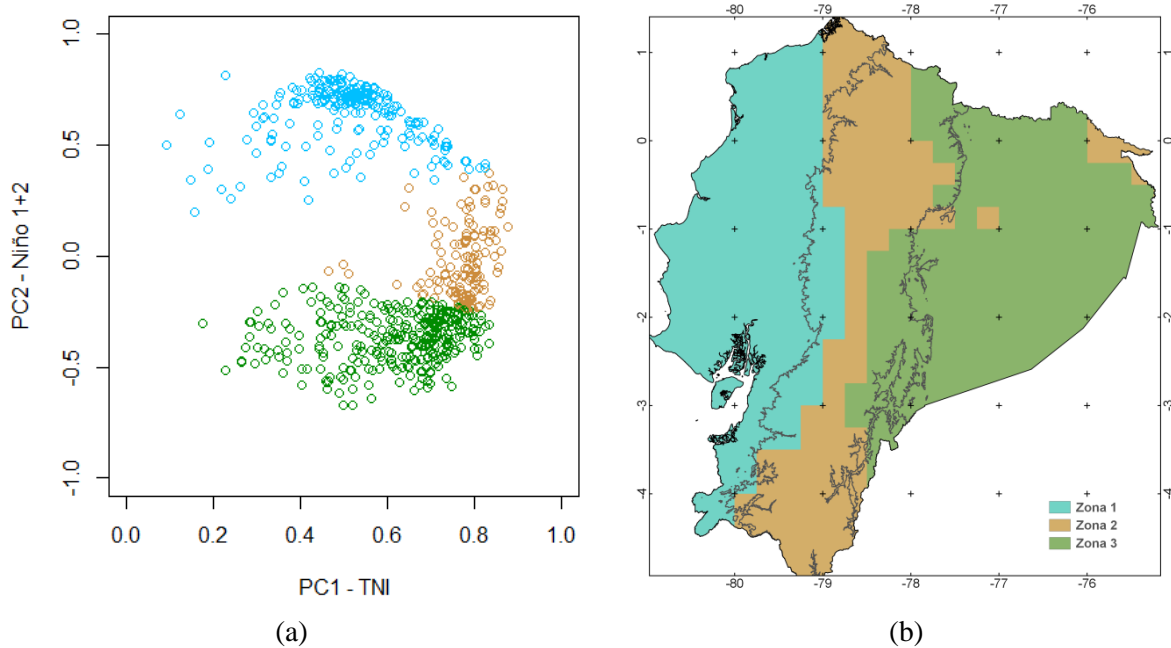


Figura 5. Interpretación conjunta TNI y niño 1+2. (a) grafico de clasificación de zonas 1, 2 y 3; (b) grafico de clasificación de zonas 1, 2 y 3.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio aplicó análisis de componentes principales sobre las imágenes satelitales TRMM de 16 años para identificar patrones espacio-temporales de precipitaciones en el Ecuador en la temporada enero a abril. Dos componentes principales fueron retenidos por su capacidad para explicar el 61% de la variabilidad de las precipitaciones y por su alta correlación con los índices ENSO Niño 1+2 y TNI. Los principales resultados muestran que el Niño 1+2 y TNI son ambos necesarios para estimar el impacto ENSO en las precipitaciones de la temporada EA. Anomalías positivas del Niño 1+2 se correlacionan positivamente con las precipitaciones en las planicies de la costa ecuatoriana y negativamente con las precipitaciones en la región amazónica. Mientras que valores altos de TNI se relacionan con un aumento de las precipitaciones en todo el país.

El patrón espacial mostrado por PC2-EA coincide con el hecho que la cordillera de los andes actúa como una divisoria del clima (Bendix & Lauer, 1992). Una mayor influencia se evidencia en la parte central de la planicie de la costa, en concordancia con los resultados de (Rossel & Cadier, 2009). Las anomalías levemente negativas de precipitaciones en la región amazónica coinciden con los resultados previamente reportados por (Vuille *et al.*, 2000).

Estudios previos ya han utilizado el índice Niño 1+2 como un indicador de ENSO para el Ecuador (Rossel & Cadier, 2009; Bendix *et al.*, 2011). Sin embargo, nuestro estudio demuestra que a nivel país el índice TNI también presenta una influencia. Es decir, se interrelacionan dos escalas: una

escala macro, a través del gradiente de temperatura en el Océano Pacífico Tropical; y una escala meso a través de la temperatura del Océano Pacífico en la región Niño1+2. Por ello, TNI y Niño 1+2 son ambos necesarios para realizar el seguimiento y predicción de ENSO de una forma adecuada en la temporada lluviosa de enero a abril en nuestra región. La necesidad de recurrir a más de un índice para predecir adecuadamente ENSO ya fue sugerido por (Trenberth & Stepaniak, 2001).

Futuros estudios serán llevados a cabo para validar estos resultados con series temporales más extensas, validar las imágenes TRMM y explorar la factibilidad de combinar TNI y Niño 1+2 en un único índice compuesto.

REFERENCIAS

- Bendix, A., J. Bendix, 2006. Heavy rainfall episodes in Ecuador during El Niño events and associated regional atmospheric circulation and SST patterns. *Advances in Geosciences*, 6(6), 43-49.
- Bendix, J., S. Gämmerler, C. Reudenbach, 2003. A case study on rainfall dynamics during El Niño/la Niña 1997/99 in Ecuador and surrounding areas as inferred from GOES-8 and TRMM-PR. *Erdkunde*, 57(2), 81-93.
- Bendix, J., K. Trachte, E. Palacios, R. Rollenbeck, D. Göttlicher, T. Nauss, A. Bendix, 2011. El niño meets la niña - Anomalous rainfall patterns in the “traditional” el niño region of southern Ecuador. *Erdkunde*, 65(2), 151-167.
- Bendix, J., W. Lauer, 1992. Die niederschlagsjahreszeiten in Ecuador und ihre klimadynamische Interpretation. *Erdkunde*, 46(2), 118-134.
- Demšar, U., P. Harris, C. Brunson, A.S. Fotheringham, S. McLoone, 2013. Principal component analysis on spatial data: an overview. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(1), 106-128.
- Hanley, D.E., M.A. Bourassa, J.J. O'Brien, S.R. Smith, E.R. Spade, 2003. A quantitative evaluation of ENSO indices. *Journal of Climate*, 16(8), 1249-1258.
- Huffman, G.J., D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, D.B. Wolff, R.F. Adler, G. Gu, Y. Hong, K.P. Bowman, E.F. Stocker, 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Kiem, A., S.W. Franks, 2001. On the identification of ENSO-induced rainfall and runoff variability: a comparison of methods and indices. *Hydrological Sciences Journal*, 46(5), 715-727.
- Machado-Machado, E., N. Neeti, J.R. Eastman, H. Chen, 2011. Implications of space-time orientation for Principal Components Analysis of earth observation image time series. *Earth Science Informatics*, 4(3), 117-124.
- Mora, D., P. Willems, 2012. Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin-Southern Andes of Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1-2), 267-282.
- Pineda, L., V. Ntegeka, P. Willems, 2013. Rainfall variability related to sea surface temperature anomalies in a Pacific--Andean basin into Ecuador and Peru. *Advances in Geosciences*, 33(33), 53-62.
- Rossel, F., E. Cadier, 2009. El Niño and prediction of anomalous monthly rainfalls in Ecuador. *Hydrological Processes*, 23(22), 3253-3260.
- Trenberth, K., D.P. Stepaniak, 2001. Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697-1701.
- Vuille, M., R.S. Bradley, F. Keimig, 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D10), 12447-12460.
- Wolter, K., M.S. Timlin, 1998. Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank? *Weather*, 53(9), 315-324.

