

CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA PARA EL PERIODO 1981-2010 EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS ZULIA Y PAMPLONITA, NORTE DE SANTANDER – COLOMBIA¹

Diego Alzate²
Edwin Rojas³
Jemay Mosquera⁴
Jacipt Ramón⁵

Recibido el 18 de diciembre de 2013, aprobado el 3 de octubre de 2014,
actualizado el 1 noviembre de 2014

DOI: 10.17151/luaz.2015.40.10

RESUMEN

El presente trabajo parte de una breve fundamentación teórica que soporta una estructura metodológica tendiente al cálculo de cambio climático, el estudio de la variabilidad climática en el territorio de las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita en Norte de Santander y la identificación inicial de medidas potenciales de adaptación al cambio climático y la variabilidad climática. En su desarrollo se identificaron y espacializaron las tendencias de cambio climático y las alteraciones más probables de los fenómenos de variabilidad climática asociados al ciclo ENSO⁶ para el período 1981-2010 en las cuencas objeto de estudio. Los resultados obtenidos muestran que la temperatura media ha cambiado entre 0,1 y 0,4°C por década en las cuencas, la precipitación ha aumentado de 0 a 250 mm/década y los ciclos ENSO generan alteraciones en la variabilidad climática de las cuencas de manera diferenciada a nivel estacional e interanual, especialmente en los trimestres Dic-Ene-Feb, Jun-Jul-Ago y Sep-Oct-Nov.

PALABRAS CLAVE

Cambio climático, variabilidad climática, adaptación, eventos climáticos extremos, vulnerabilidad.

CLIMATE CHANGE AND CLIMATE VARIABILITY FOR THE PERIOD 1981-2010 IN THE BASINS OF THE ZULIA AND PAMPLONITA RIVERS, NORTE DE SANTANDER – COLOMBIA

ABSTRACT

This work is based on a brief theoretical foundation that supports a methodological structure aimed at the calculations of climate change, the study of climate variability in the territory of the basins of the Zulia and Pamplonita rivers in Norte de Santander and the initial identification of potential measures of adaptation to climate change and climate variability. In its development, the climate change trends and the most likely alterations of the climate variability phenomena associated with the ENSO cycle for the period 1981-2010 in the basins of the object of study were identified and spatialized. The results obtained show that the average temperature has changed between 0.1 and 0.4°C per decade in the basins, precipitation has increased from 0 to 250 mm/decade and the ENSO cycles generate alterations in the climate variability of the basins on a differentiated manner on a seasonal and year-on-year level, especially in the Dec-Jan-Feb, Jun-Jul-Aug and Sep-Oct-Nov quarters.

KEY WORDS

Climate change, climate variability, adaptation, extreme weather events, vulnerability

INTRODUCCIÓN

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010) menciona que la temperatura media del país está aumentando a una tasa de cambio de 0,13°C por década para el período 1971-2000, y el departamento de Norte de Santander es uno de los que ha sentido mayormente este aumento. De la misma forma, la temperatura media en el territorio nacional continuará incrementándose durante el transcurrir del siglo XXI de tal manera que para el período 2011-2040 habría aumentado en 1,4°C, para 2041-2070 en 2,4°C y para 2071-2100 en 3,2°C. Los aumentos más significativos de la temperatura media se esperan en gran parte de las regiones Caribe y Andina, especialmente en los departamentos de Sucre, Norte de Santander, Risaralda, Huila y Tolima.

Los recientes acontecimientos climáticos bajo escenarios de cambio climático y de fenómeno de La Niña, que en el país se conocieron como “la ola invernal 2010-2011”, han golpeado fuertemente al departamento de Norte de Santander (Becher, 2012), el cual resultó ser uno de los más vulnerables. Los fenómenos que más afectaron al territorio departamental fueron deslizamientos e inundaciones, lo cual llevó a la pérdida de vidas humanas así como económicas que han agudizado la crisis y generado un retroceso en el desarrollo regional. Paradójicamente, ante tal vulnerabilidad, existen deficiencias a nivel regional para enfrentar estos impactos a nivel institucional y comunitario, dificultades para acceder a la información, lo que impide mejorar la gestión de información hidroclimática, como clave para la zonificación del riesgo climático y la generación de alertas tempranas, así como otros insumos necesarios para apoyar la toma de decisiones y los procesos de planificación, ordenamiento territorial, gestión del riesgo y adaptación al cambio climático.

Es evidente que Colombia debe dedicar gran esfuerzo a generar conocimiento y prepararse para los posibles impactos de fenómenos climáticos e implementar medidas de adaptación en el territorio (Costa, 2007). Por lo tanto, en el presente documento se identifican señales de cambio climático y variabilidad climática en las cuencas de los ríos Pamplonita y Zulia y su distribución territorial esperando que sean la base para la construcción de medidas clave para la mitigación y adaptación a los impactos actuales y esperados del cambio climático.

METODOLOGÍA

En el estudio se hace una primera aproximación para identificar la relación del cambio climático y la variabilidad climática a través de la detección y cuantificación de tendencias de cambio en las series de tiempo de temperaturas y precipitaciones registradas por las estaciones del IDEAM localizadas en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita y el estudio de la variabilidad climática. El análisis de las señales de cambio climático responde a una escala regional y local, que resulta una alternativa a los modelos globales de circulación que generan resultados a escala general. Para cuantificar las tendencias detectadas y estimar la magnitud de las alteraciones climáticas en los últimos años se utiliza la estadística no-paramétrica

(Castro y Carvajal-Escobar, 2010) y un proceso de interpolación a través del método de Distancia Inversa Ponderada (IDW), para modelar la distribución espacial de las tendencias climáticas en la zona de estudio. Se evaluó, además, la bondad de ajuste del método de interpolación a través de la técnica de validación cruzada y se obtuvo una serie de conclusiones que pueden servir de base para la formulación de estrategias de mitigación y adaptación a los impactos cambio climático y la variabilidad climática.

RESULTADOS

Cambio climático y variabilidad climática

El calentamiento observado en los últimos 50 años es probablemente mayor que en cualquier otro periodo similar en los últimos 1.300 años. La temperatura global aumentó 0,74°C entre 1906 y 2005 (mayor que el 0,6°C registrado entre 1901 y 2000) y la tendencia de calentamiento de los últimos 50 años es de 0,13°C por década. Según Gay, Estrada y Sánchez (2008), a partir de 1977 la tasa de incremento en las temperaturas globales es 5 veces mayor, mientras que en el caso de las temperaturas del hemisferio norte, dicha tasa ha aumentado en más de 8 veces a partir de 1985.

Según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) el cambio climático es la “variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos” (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/les/annexannexo-2-1.html). El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra.

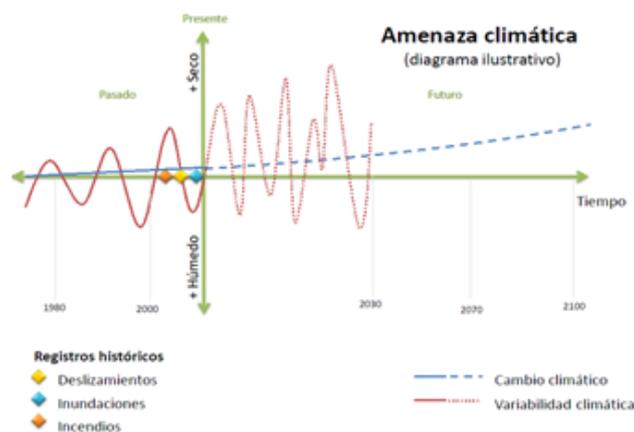
En cuanto a la variabilidad climática, responde a las fluctuaciones del clima que a través de los años y desde épocas remotas se han presentado en diversas escalas de tiempo y espacio.

Tales fluctuaciones se originan, generalmente, por modificaciones en la forma de interacción entre los distintos componentes del sistema climático y por cambios en los factores radiativos forzantes (Pabón, 1998). La variabilidad climática se evidencia en períodos de tiempo relativamente cortos, lo cual la diferencia del cambio climático, y se manifiesta en valores de variables climatológicas como la temperatura y la precipitación, las cuales son comparadas con un valor normal⁷. La secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías (Montealegre y Pabón, 2000).

Según Boshell, León y Peña (2011), se reconocen las siguientes escalas temporales de la variabilidad climática:

- Escala intra-estacional (veranillos e intensificación de las lluvias).
- Escala estacional (estaciones lluviosas y secas).
- Escala interanual (teleconexiones y ciclos de más de un año de duración).
- Escala interdecadal (fluctuaciones climáticas).

Se considera que la variabilidad y el cambio climático tienen una relación directa y que interactúan constantemente asociados a los cambios en el forzamiento radiativo no natural, que tiene su origen en el efecto invernadero antropogénico. En general, se puede decir que el cambio climático vuelve más extremos e intensos los fenómenos de variabilidad climática, siendo posible en los próximos años un aumento de eventos extremos climáticos (que desencadenan inundaciones, deslizamientos e incendios forestales) asociados a los fenómenos ENSO (El Niño-La Niña) (Figura 1).



Fuente: PRICC (2011).

Figura 1. Interacción actual y futura entre variabilidad y cambio climático.

Aspectos metodológicos del desarrollo procedimental

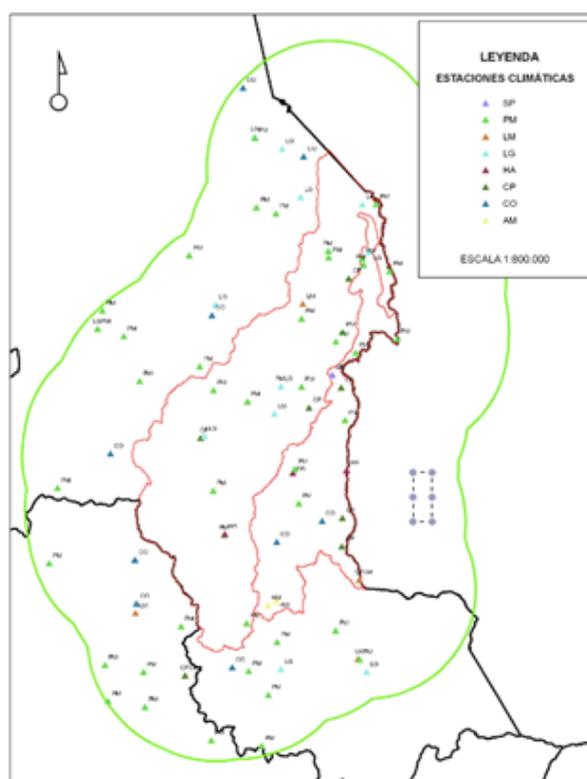
El área de estudio del presente trabajo corresponde a las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita ubicadas en el departamento de Norte de Santander, que son de carácter binacional (por ser compartidas con la República Bolivariana de Venezuela). A continuación se presenta una descripción general de cada cuenca.

La cuenca del río Zulia se localiza en la parte media del departamento de Norte de Santander, en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental colombiana (Infante, 2008a). Esta es una cuenca binacional, debido a que sus aguas en la parte baja de la cuenca continúan fluyendo sobre territorio venezolano. La cuenca se ubica entre las coordenadas planas Norte: 1°290.000 y 1°430.000 y Este: 1°118.000 y 1°190.000, con origen en el Observatorio Astronómico Nacional. Esta cuenca tiene una extensión de 348541 hectáreas (ha) (3485,4 km²) que corresponde al 15,7% del territorio del departamento de Norte de Santander y finaliza en el municipio de Puerto Santander donde el río Zulia se empieza a extender en territorio venezolano. La extensión de su territorio abarca cotas altitudinales entre los 50 y los 4200 msnm con pendientes que van desde 0% (plana) hasta mayores a 75% (muy escarpada). El cauce principal se forma en el municipio de Arboledas en donde confluyen los ríos Arboledas y Cucutilla.

La cuenca del río Pamplonita se encuentra ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, al sureste del departamento de Norte de Santander (Infante, 2008b) (Figura 4). La cuenca posee el margen izquierdo del río Táchira, corriente que sirve como límite internacional entre Colombia y la república de Venezuela. Esta cuenca está comprendida entre coordenadas planas Norte: 1°300.000 y 1°415.000 y Este: 1°150.000 y 1°195.000. Comprende una extensión de 134536 ha (1345,4 km²) que corresponden al 6% del área departamental (Arango et

al., 2006). Su territorio, que se encuentra entre los 50 y los 3550 msnm, presenta una forma alargada en dirección suroeste-noreste. El cauce principal se forma en el municipio de Pamplona en la confluencia de las quebradas El Rosal y Navarro que forman la quebrada El Volcán, y finaliza cerca del centro poblado de Puerto Villamizar en el municipio de Cúcuta al confluir en el río Zulia. Este río vierte sus aguas al río Catatumbo y llega a la vertiente del Caribe en el Lago de Maracaibo, en el estado Zulia en Venezuela.

Con ayuda de un Sistema de Información Geográfico (SIG) y a partir de la capa del catálogo de estaciones del IDEAM (2013), fueron preseleccionadas las estaciones con información de precipitaciones y temperaturas a incluir en el análisis de variabilidad climática. La selección se realizó a partir de un búfer de 30 km a partir del límite de la cuenca de los ríos Pamplonita y Zulia, con el fin de incluir en la selección estaciones vecinas que permiten hacer análisis más robustos para el área de interés y disminuir la probabilidad de dejar alguna zona sin información. (Figura 2).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 2. Estaciones activas seleccionadas. Cuenca Pamplonita y Zulia.

De esta manera, en el desarrollo del trabajo, se identificaron 170 estaciones climáticas potenciales. Se incluyeron en el análisis 60 estaciones IDEAM con un periodo mínimo de extensión del registro de 30 años cada una, como sugiere la Organización Meteorológica Mundial (OMM). El número y tipo de estaciones utilizadas se muestra a continuación:

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del IDEAM en la zona de estudio

Tipo Estación	Símbolo	No.
Sinóptica Principal	SP	1
Climatológica Principal	CP	5
Climatológica Ordinaria	CO	9
Pluviométrica	PM	44
Agrometeorológica	AM	1

Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Para llevar a cabo el estudio, se procedió a adelantar las siguientes acciones:

a) Control de calidad por medio de la verificación de grandes errores, de la coherencia interna y de la coherencia temporal. En la verificación de grandes errores se comprobaron los siguientes límites para los datos en las series del IDEAM: Precipitación: >0 (mm) y Temperatura: de 0 a 50°C (este rango es según el área a trabajar), mientras que en la comprobación de la coherencia interna, se definió el umbral de desviaciones estándar a 3σ y 4σ para identificar datos extraordinarios y evaluar si corresponden a un evento extremo o a un error digital. En cuanto a la coherencia temporal, se evaluó la secuencia temporal de información de observaciones mediante métodos estadísticos y físicos, comprobando valores iguales consecutivos y al menos dos años con un mínimo de 5 datos similares.

b) Verificación de la coherencia espacial/temporal por medio de la evaluación de outliers y/o eventos extremos en las series y su relación con los fenómenos ENSO.

c) Comprobación de la homogeneidad de las series, para lo cual se realizó en primer lugar un proceso de regionalización, clusterización o zonificación de las estaciones por patrones climáticos (distribución y volúmenes de lluvia o valores de temperatura), para luego aplicar el tests de homogeneidad por regiones o clusters (Dobles masas, Prueba F y t para varianza y medias, SNHT test (Standard Normal Homogeneity Test) o Alexandersson para detectar cambios en las series.

d) Completado de datos faltantes a través del método de las proporciones (Paulhus y Kohler, 1952 citado por Guijarro, 2011), el cual, utiliza la técnica de interpolación espacial y los valores de las variables registradas en estaciones vecinas dando ponderación a la distancia entre estaciones. En este proceso se utilizó el programa Climatol, desarrollado como software libre con licencia GNU-GPL para usar sobre el código R (Guijarro, 2011).

e) Verificación, mediante el test de McCuen (sugerido por el IDEAM), el cual detecta cuando las medias anuales de las series observadas y las series complementadas difieren en más del 10%, lo cual permite rechazar el dato complementado. La fórmula de este Test es: $(P_{xf} - P_{xi}) * 100 / P_{xi}$, donde P_{xf} es el promedio de los datos completados para el mes x y P_{xi} es el promedio inicial de los datos para el mes x.

f) Estimación de tendencias de cambio climático, mediante método gráfico, comparando los valores medios mensuales de las normales climatológicas 61-90, 71-00, 81-10, y mediante el método estadístico no paramétrico de Sen (Sen, 1968) y

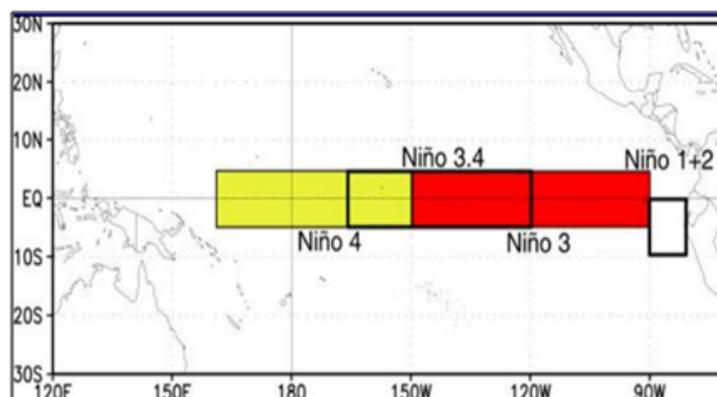
la significancia estadística gracias al test de Mann-Kendall (MK Test) (Mann, 1945; Kendall, 1975):

$$b = \text{median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right)$$

Donde b es la estimación de la pendiente de una tendencia, X_i es el dato medido en el tiempo i , X_j es el dato medido en el tiempo j , e i es el tiempo después del tiempo j .

g) Análisis y espacialización de la variabilidad climática. A través de la técnica de análisis compuesto se determinó la relación entre los eventos ENOS (El Niño y La Niña) y la variación de la temperatura y la precipitación en las cuencas. Dicha técnica se basa en el Índice Oceánico Niño (ONI), calculado por la NOAA (National Oceanic and Atmosphere Administration) a partir de datos climáticos para cada estación y a partir del cálculo de terciles (NOAA, 2013), teniendo en cuenta que el tercil inferior define la categoría de la variable analizada con valores “por debajo de lo normal”, el tercil superior define la categoría de la variable analizada que registra valores en el rango “normal” y el tercil superior define la categoría de la variable analizada con valores “por encima de lo normal”. El ONI en la región 3.4 a partir de las temperaturas superficiales del mar, permitió conocer la presencia o ausencia de los eventos Niño y Niña y predecir su evolución (**Figura 3**).

Con los resultados obtenidos se generaron mapas de la probabilidad de la ocurrencia de la variable en cada categoría (por encima, dentro y por debajo de lo normal) por trimestres para los eventos ENSO, utilizando el método de interpolación IDW. Estas salidas cartográficas permiten identificar zonas con diversas probabilidades de ocurrencia de alteraciones de los valores climáticos durante eventos ENSO.



Fuente: CPC-NOAA (2013).

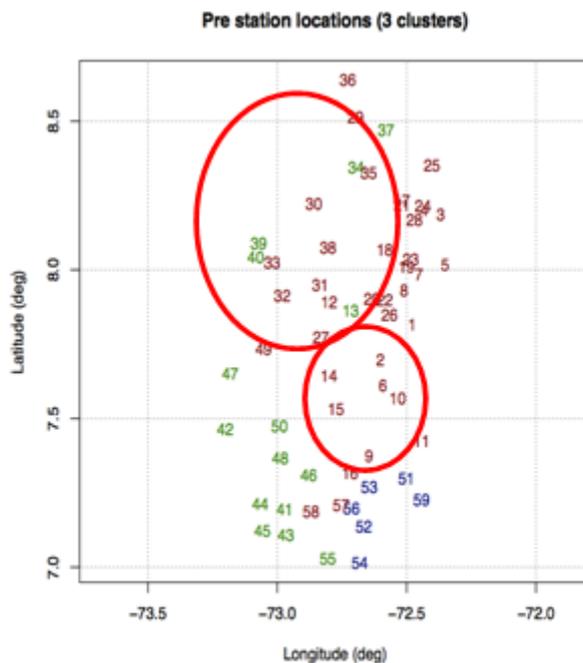
Figura 3. Regiones de análisis de la temperatura superficial del mar en el Pacífico.

Análisis y espacialización del cambio climático

A continuación se presentan los resultados relacionados con cambio climático en cuanto a temperatura media anual (T_m) y precipitación promedio anual (PP):

A través del proceso de control de calidad se filtraron grandes errores en las series

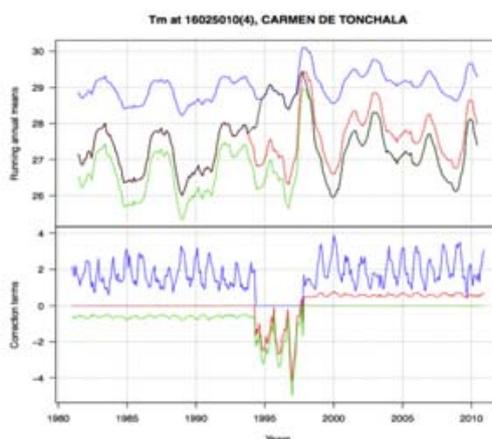
del IDEAM utilizadas. El proceso de homogenización permitió identificar 2 regiones diferenciadas, una que recibe la influencia climática de la *Orinoquía* y que se ubica hacia el suroriente, otra que se localiza en al *sur y centro de la cuenca Pamplonita*. En la **Figura 4** se muestra la zonificación de las estaciones de acuerdo a la estacionalidad y cantidad de lluvias.



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 4. Zonificación o clusterización de estaciones.

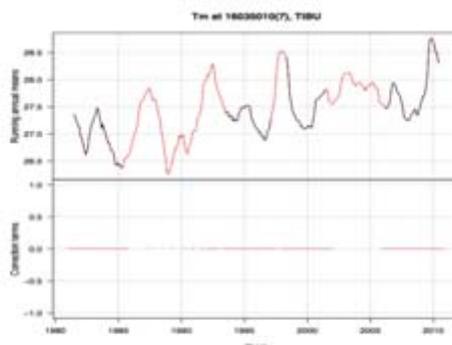
Se rechazó una estación para temperatura media anual (Carmen de Tonchalá) y para precipitación promedio anual cinco (5): Cornejo (16020190), Planadas (16020340), San Gil (16030060), Lourdes (16030080) y Divisiones (16030140). En la **Figura 5** se presenta un ejemplo de serie no homogénea descartada.



Fuente: Autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 5. Serie no homogénea de la estación Carmen de Tonchalá en Cúcuta.

Los datos con control de calidad, inhomogeneidades corregidas y datos completos fueron posteriormente utilizados en los análisis de cambio y variabilidad climática para la cuenca del río Pamplonita. En la **Figura 6** se presenta un ejemplo de serie completada (línea roja).

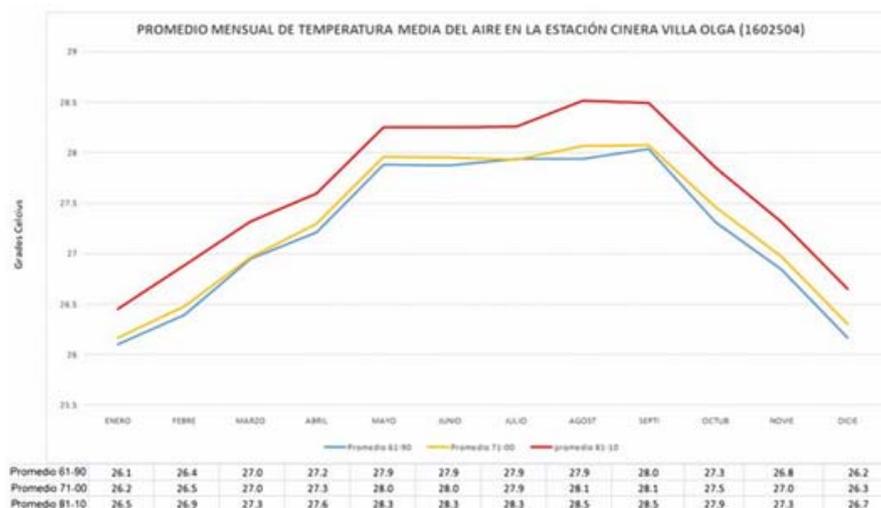


Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 6. Serie completa de la estación Tibú.

Utilizando el test de McCuen se comprobaron los valores completados sin encontrar valores que superarán el umbral del 10%.

La estimación de tendencias de cambio climático, representadas en la temperatura media anual (Tm), se llevó a cabo a través del método gráfico, a través del cual se identificaron tendencias positivas de aumento de la temperatura en las estaciones analizadas (línea roja corresponde a la normal climatológica 1981-2010). En la **Figura 7** se muestran los resultados para la estación Cinera Villa Olga en Cúcuta.



Fuente: autores.

Figura 7. Análisis gráfico de tendencia para la temperatura media anual.

Haga click en la imagen para ampliarla

Utilizando el método no paramétrico de Sen, se obtuvieron los resultados de tendencia de cambio para temperatura media anual que se observan en la **Tabla 2**.

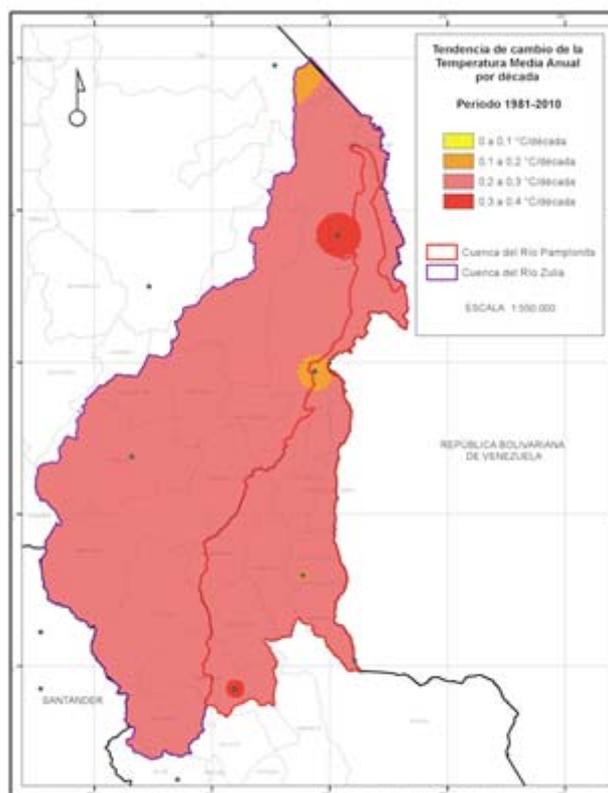
Tabla 2. Variación decadal de la Tm

Estación	Mann-Kendall trend	Tendencia (°C/10 años)
APTO CAMILO DAZA [16015010]		0,15
ISER PAMPLONA [16015020]	***	0,35
ESPERANZA LA [16015030]	*	0,19
TAMA PARQUE NAL [16015090]	**	0,25
SALAZAR [16025030]	*	0,26
CINERA VILLA OLGA [16025040]	***	0,38
TIBU [16035010]	***	0,38
PETROLEA [16035020]		0,06
SARDINATA [16035030]	**	0,3
VIVERO SURATA [23195090]	+	0,13
ESC AGR CACHIRA [23195180]	**	0,29
CACHIRI [23195200]	**	0,27
SILOS [37015010]	+	0,16
BERLIN [37015020]	*	0,18
TUNEBIA [37035010]	*	0,19

Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

El nivel de confianza estadística se interpreta de la siguiente forma: ***: 99,9%, **: 99,0%, *: 95,0% y +: 90,0%.

En general los resultados obtenidos reflejan una tendencia generalizada de aumento de la temperatura media en todas las estaciones analizadas. Trece (13) estaciones tienen un nivel de confianza estadística de 90%, 11 mayor al 95%, 7 del 99% y en 3 un nivel de confianza del 99,9%. Los aumentos están en el rango de 0,13 a 0,38°C/década, con un valor medio de 0,26°C/década. El promedio para todas las estaciones con tendencia incremental fue de 0,24°C/década. (Figura 8).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 8. Tendencia de cambio ($^{\circ}\text{C}/\text{dec}$) – Tm.

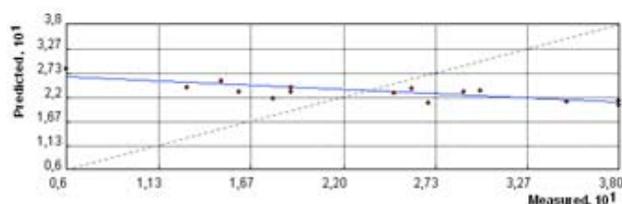
De acuerdo con la **Figura 8**, la más alta tendencia de aumento de temperatura media ($0,38^{\circ}\text{C}/\text{década}$) se registró en 2 estaciones ubicadas por debajo de los 100 msnm (TIBÚ y CINERA VILLA OLGA) y en ISER PAMPLONA ($0,35^{\circ}\text{C}/\text{década}$) localizada a 2340 msnm (ISER PAMPLONA), siendo una de las de mayor altura. El efecto invernadero antrópico, potenciado por las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) y que ha dado origen a lo que se conoce como cambio climático global, sumado a procesos de deforestación acelerada que se han dado en las cuencas Zulia y Pamplonita en décadas recientes, pueden explicar en gran medida, los aumentos de la temperatura en partes bajas y altas de la cuenca, teniendo en cuenta el efecto directo del cambio de cobertura en la reflexión de la radiación solar, la evapotranspiración y la regulación hídrica (cambio climático local).

Los resultados de la validación cruzada indican que para la variable temperatura media anual se da un buen ajuste entre los datos generados por el modelo de interpolación y las tendencias climáticas calculadas. En la **Figura 9**, se observan los valores de las tendencias de la variable (Measured), frente a los datos generados por el modelo de interpolación IDW (Predicted). En la medida en que haya más separación entre los puntos y la línea azul, existe mayor error entre lo medido y lo que predice el modelo. Para el caso de la variable temperatura media anual, no se observan diferencias muy grandes. En la **Tabla 3**, se observa el valor del coeficiente de determinación (R^2) para la temperatura media anual, el cual es alto, valida el modelo de interpolación y refleja que la señal de cambio para esta variable es clara y contundente para el territorio de las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita.

Tabla 3. Coeficiente de determinación (R^2), error medio y el error cuadrático medio para la precipitación media anual

Temperatura media anual	
R^2	0,63
Error medio	-0,002
Error cuadrático medio	0,108

Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 9. Validación cruzada del modelo de interpolación IDW para la Tm.

Utilizando el método no paramétrico de Sen se obtuvieron los resultados para precipitación promedio anual (PP). (Tabla 4).

Tabla 4. Variación decadal de la PP

Estación	Mann-Kendall trend	Tendencia (mm/10 años)
VILLA DEL ROSARIO	+	129,1
DONJUANA LA 2		36,0
STARITA		124,6
JARRA LA		76,1
RICOURTE	*	216,3
MANZANARES		86,8
TASAJERO	**	260,6
APTO CAMILO DAZA	*	112,7
ISER PAMPLONA		9,3
ESPERANZA LA		26,3
TAMA PARQUE NAL		73,9
GRAMALOTE		75,4
ARBOLEDAS		-15,3
CUCUTILLA	+	181,8
CALDERA LA		4,9
BARRANCAS		141,7
BOCATOMA RÍO ZULIA		137,7

CERRO PELAO	**	282,4
VACAS LAS		26,1
URIMACO	*	206,4
AGUABLANCA		49,8
PTO SANTANDER		181,9
CARMEN DE TONCHALÁ	+	124,5
SALAZAR		48,8
CINERA VILLA OLGA		80,7
CAMPO TRES		-28,0
VILLA CARO		-11,6
SAN JUAN		45,2
LIBERTAD LA		91,7
TIBÚ	**	347,8
SARDINATA	+	114,7
ESC AGR CÁCHIRA		57,6
SILOS		-0,8
BERLÍN		9,8
"LABATECA"		-2,0
"CHITAGÁ"		132,4
"CÁCOTA"		48,6

"PRESIDENTE"		87,1
"RINCÓN LOS"		50,1
"SAN BERNARDO BATA"		-6,3
SANTIAGO CAIMITO		-0,2
PETROLEA		-92,6
ALTO EL VENADO	**	343,5
CHORRO EL		104,2
TONA		-34,2
PLAYÓN EL	*	161,1
PICACHO EL		-94,1
MATAJIRA		-28,7
GALVICIALA		-20,0
VETAS-EL POZO	+	105,0
VEGA LA	*	162,2
VIVERO SURATÁ		41,0
CACHIRÍ		65,2
PORTILLO EL		-126,8

Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

El nivel de confianza estadística se interpreta de la siguiente forma: ***: 99,9%, **: 99,0%, *: 95,0% y +: 90,0%.

Como se puede observar, se determinó una tendencia generalizada de aumento de la precipitación total anual en 41 de las 54 estaciones analizadas. En 14 de estas, se supera el nivel de confianza estadística de 90%, en 9 estaciones el nivel de confianza es mayor al 95% y en 4 estaciones el nivel de confianza es del 99,9%.

Para las estaciones que mostraron aumento significativo de precipitación por década (nivel de confianza >90%), este aumento está en el rango de 10,50 a 34,78 mm/año, con un valor medio de 19,628 mm/año. Al promediar todas las estaciones que mostraron tendencia incremental, esta tendencia es de 11,368 mm/año. Es importante destacar, que la más alta tendencia de aumento de precipitación total anual (34,784 mm/año), se registró en la estación Tibú, que es a su vez una región rodeada de una gran extensión de bosques tropicales con algunos sectores en gran estado de conservación y que registra también elevados volúmenes de precipitaciones, es decir, una zona húmeda que se volvería más húmeda, lo cual es consistente con lo que indica el IPCC (2007), es de esperar que las zonas secas sean cada vez más secas y las más lluviosas reciban mayores precipitaciones. En las estaciones que registran disminuciones de la precipitación total anual no se obtuvo significancia estadística superior al 90%, y sus valores fluctúan entre -12,675 mm/año y -0,018 mm/año.

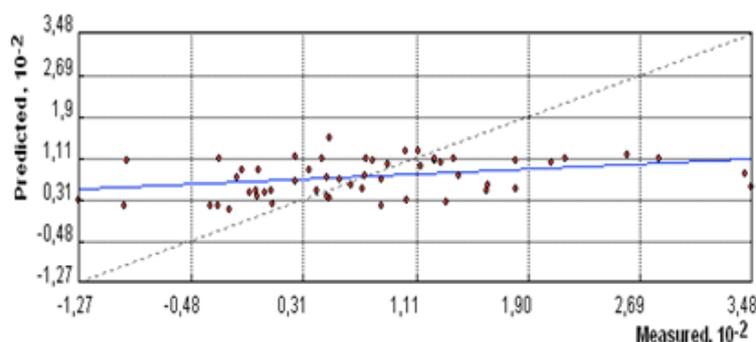
En general, sin tener en cuenta el nivel de confianza estadística, la tasa de cambio promedio para la variable precipitación total anual en la zona de estudio fue de 7,844 mm/año. La **Figura 10** muestra la distribución espacial de los cambios que ha registrado la precipitación total anual en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita (utilizando el método de interpolación IDW), observándose que en casi toda la

muy grandes. En la **Tabla 5**, se observan los valores del coeficiente de determinación (R^2) para la precipitación media anual, el cual no es muy alto, por lo que es necesario buscar la forma de mejorar la confiabilidad de los mapas.

Tabla 5. Coeficiente de determinación (R^2), error medio y el error cuadrático medio para la precipitación media anual

Temperatura media anual	
R^2	0,11
Error medio	-0,21
Error cuadrático medio	93,37

Fuente: autores.



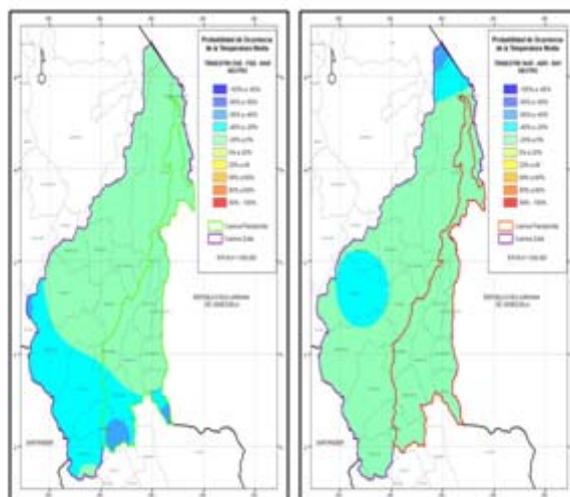
Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 11. Validación cruzada del modelo de interpolación IDW para la PP.

Análisis y espacialización de la variabilidad climática

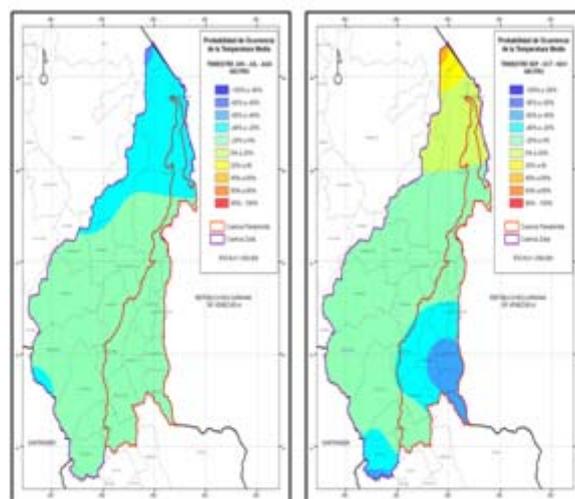
El proceso de estudio de la variabilidad climática se realizó por evento (Neutro, Niño y Niña) para cada trimestre agroclimático: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA), Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). Los resultados se muestran a continuación:

Las alteraciones más significativas de la temperatura media bajo la influencia de un evento neutral se dan en los trimestres DEF y MAM indicando una alta probabilidad de que las temperaturas se comporten dentro de lo normal (color verde y amarillo). El trimestre JJA es el menos significativo en cuanto a la señal del ENSO, en el cual se tienen amplios sectores (tonos azules) que no reflejan un comportamiento climático coherente con lo esperado bajo períodos de neutralidad por indicar comportamiento de la temperatura por encima de lo normal (**Figuras 12 y 13**).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 12. Escenario neutro. Alteraciones más probables para la Tm en DEF (izquierda) y MAM (derecha).

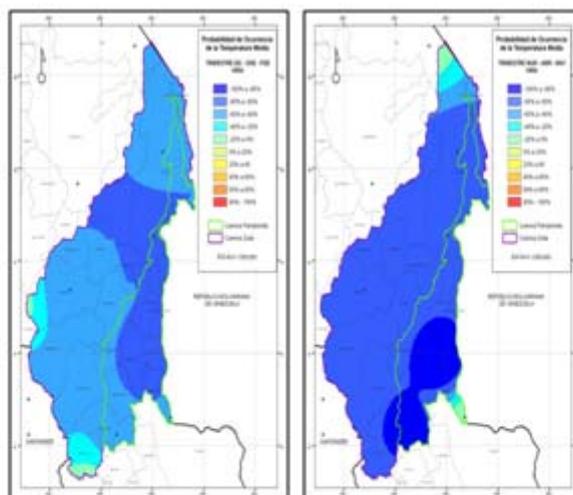


Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 13. Escenario neutro. Alteraciones más probables para la Tm en JJA (izquierda) y SON (derecha).

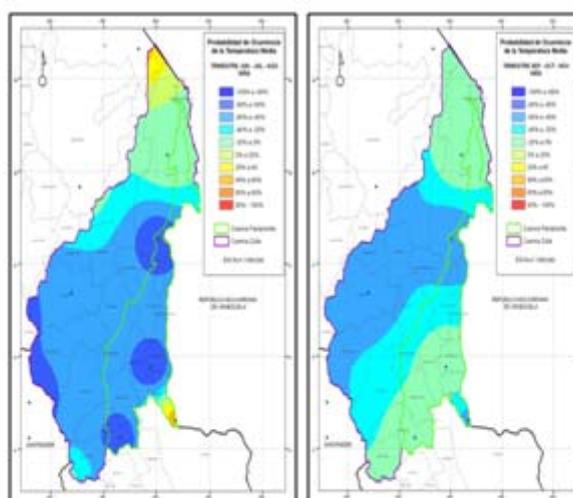
Las alteraciones más significativas de la temperatura media bajo la influencia de un evento La Niña se dan en los trimestres DEF y MAM indicando una probabilidad entre 20% y 100% (ligera a fuerte) de que las temperaturas se comporten por debajo de lo normal (tonos azules). Los trimestres JJA y SON son los menos significativos en cuanto a la señal del ENSO, en el cual se tienen sectores (tonos verdes) que no reflejan un comportamiento climático coherente con lo esperado bajo el fenómeno

de La Niña por indicar comportamiento de la temperatura dentro de lo normal (Figuras 14 y 15).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 14. Escenario Niña. Alteraciones más probables para la Tm en DEF (izquierda) y MAM (derecha).

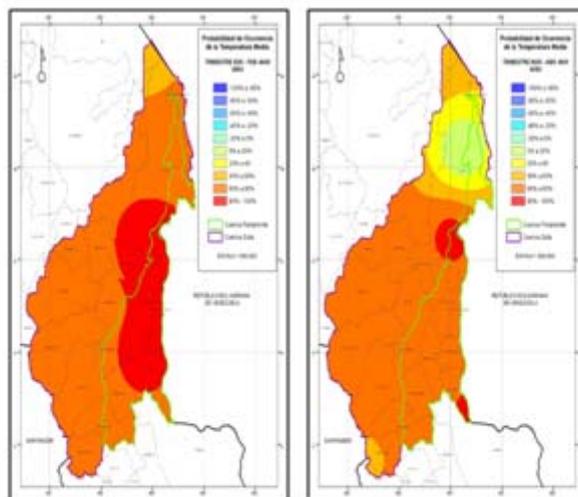


Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 15. Escenario Niña. Alteraciones más probables para la Tm en JJA (izquierda) y SON (derecha).

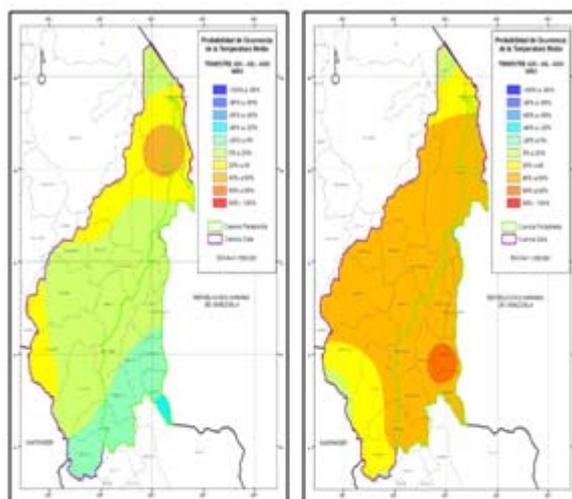
Las alteraciones más significativas de la temperatura media bajo la influencia de un evento El Niño se dan en los trimestres DEF y MAM indicando una ligera a alta probabilidad (entre 20% y 100%) de que las temperaturas se comporten por encima de lo normal (colores naranja y rojo). El trimestre JJA es el menos significativo en

cuanto a la señal del ENSO por indicar comportamiento de la temperatura dentro de lo normal (Figuras 16 y 17).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

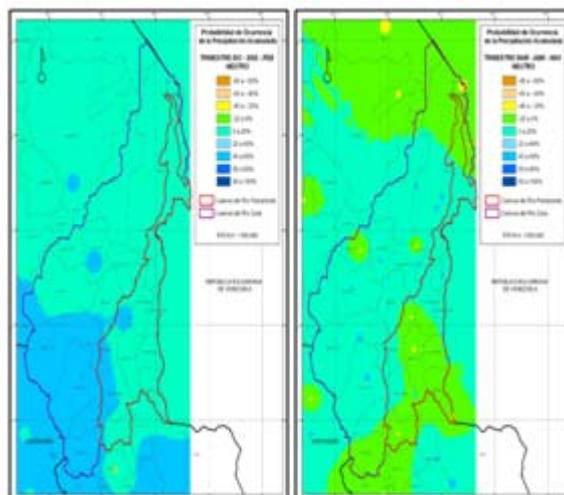
Figura 16. Escenario Niño. Alteraciones más probables para la Tm en DEF (izquierda) y MAM (derecha).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

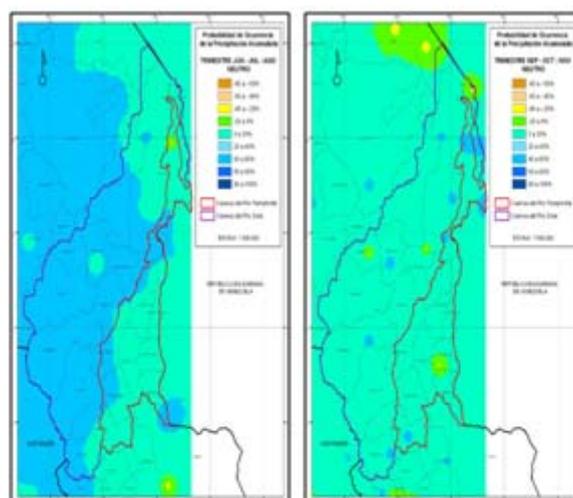
Figura 17. Escenario Niño. Alteraciones más probables para la Tm en JJA (izquierda) y SON (derecha).

En general la **precipitación** bajo periodos de neutralidad muestra una tendencia a comportarse dentro de lo normal (colores verde y amarillo) a excepción de los trimestres MAM y JJA en algunos sectores de las cuencas, cuya probabilidad es ligera a que las lluvias se comporten por encima de lo normal (color azul). (Figuras 18 y 19).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

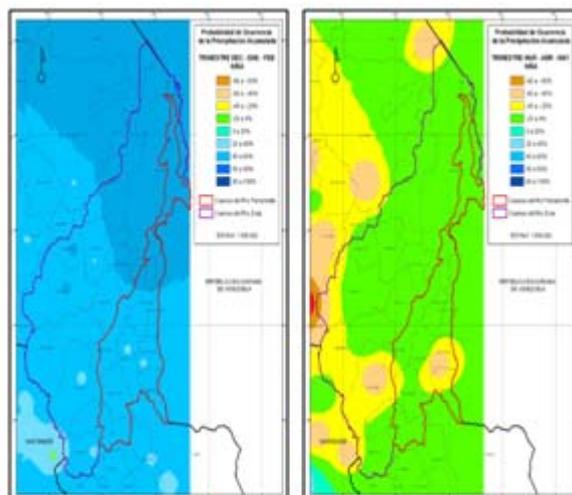
Figura 18. Escenario neutro. Alteraciones más probables para la PP en DEF (izquierda) y MAM (derecha).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

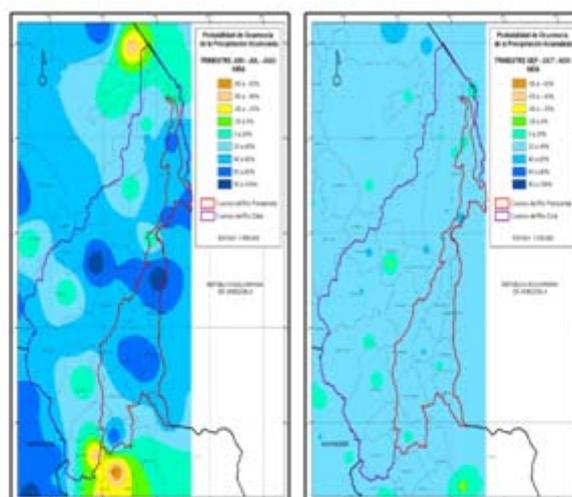
Figura 19. Escenario neutro. Alteraciones más probables para la PP en JJA (izquierda) y SON (derecha).

En general se observa que las alteraciones más significativas de la precipitación bajo la influencia de un evento La Niña se dan en los trimestres DEF y JJA indicando una ligera a alta probabilidad (entre 20% y 80%) de que las lluvias se comporten por encima de lo normal (tonos azules). Nuevamente el trimestre MAM no es significativo en cuanto a la señal del ENSO, y no se refleja un comportamiento climático coherente con lo esperado (tendencia a que las lluvias se comporten dentro de lo normal). (Figuras 20 y 21).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

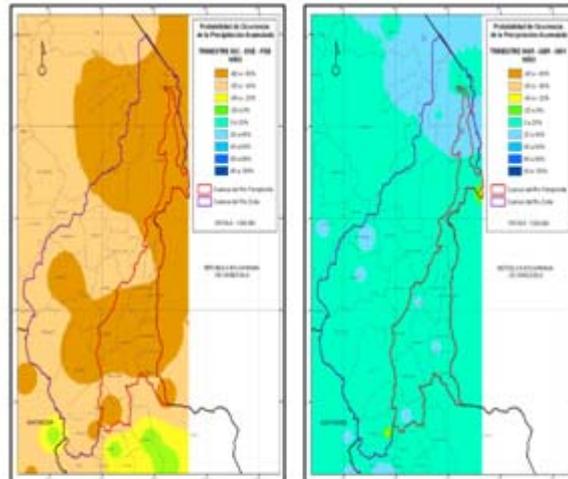
Figura 20. Escenario Niña. Alteraciones más probables para la PP en DEF (izquierda) y MAM (derecha).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

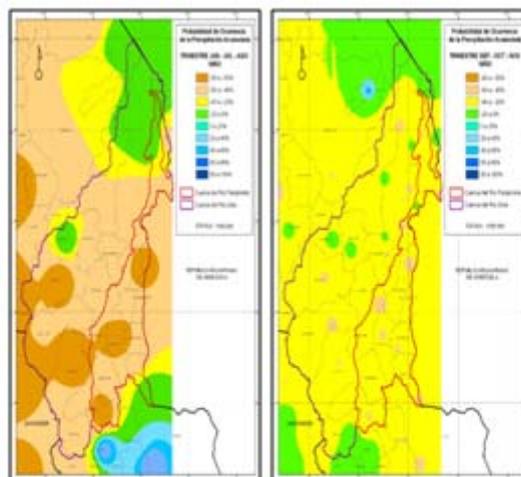
Figura 21. Escenario Niña. Alteraciones más probables para la PP en JJA (izquierda) y SON (derecha).

Las alteraciones más significativas de la precipitación bajo la influencia de un evento El Niño se dan en los trimestres DEF y JJA indicando una ligera a alta probabilidad (entre -80% y -20%) de que las lluvias se comporten por debajo de lo normal (tonos cafés y amarillos), en gran parte del área de las cuencas. Nuevamente el trimestre MAM no es significativo en cuanto a la señal del ENSO, y no se refleja un comportamiento climático coherente con lo esperado bajo el fenómeno El Niño (tendencia a que las lluvias se comporten dentro de lo normal). (Figuras 22 y 23).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 22. Escenario Niño. Alteraciones más probables para la PP en DEF (izquierda) y MAM (derecha).



Fuente: autores, a partir de Alzate (2014).

Figura 23. Escenario Niño. Alteraciones más probables para la PP en JJA (izquierda) y SON (derecha).

CONCLUSIONES

Las cuencas de los ríos Pamplonita y Zulia son altamente vulnerables a los efectos actuales y esperados del cambio climático y de la variabilidad climática, donde se han detectado aumentos para el período 1981-2010 de entre 0,1°C y 0,4°C por década para la temperatura media y de 0 a 250 mm/década en las precipitaciones medias anuales, con una distribución diferenciada en el territorio de las cuencas pero que se caracteriza porque las zonas secas recibirán menos lluvias y las zonas húmedas mayores precipitaciones.

La tendencia de aumento de la temperatura es clara para el área de las cuencas Zulia y Pamplonita, sin embargo, para la variable precipitación, aunque a nivel estadístico se ha registrado tendencia positiva, este resultado parece estar ampliamente influenciado por el fenómeno de La Niña 2010-2011, el cual aumentó significativamente los volúmenes de lluvias a nivel intra-anual e interanual y, por ende, sumado a otros episodios La Niña registrados en el período bajo análisis (1980-2011) denotan una tendencia al aumento generalizado de las lluvias en el área de la cuenca. Sin embargo, a diferencia de la temperatura, un análisis más profundo de la precipitación requeriría un tratamiento diferente a escala de variabilidad climática, para conocer el impacto directo en la distribución espacial y temporal sobre el territorio (totales anuales no es lo mejor).

A nivel regional, en las cuencas de los ríos Pamplonita y Zulia se cuenta con dos patrones climáticos diferentes, que inciden en un comportamiento diferenciado a la influencia de los fenómenos ENSO. Existe un patrón de la región Andina, con dos temporadas de lluvias y dos de menores lluvias ("secas") que predomina en casi toda la extensión de las cuencas (sur, occidente y norte) y un patrón de la Orinoquía que se presenta en el suroriente (sectores de Herrán) y que se caracteriza por un comportamiento monomodal donde los eventos ENSO no parecen relacionarse de forma clara con las variaciones en el clima.

La variabilidad climática extrema es un problema de gran complejidad que afecta a las cuencas, como se demostró en la ola invernal 2010-2011 bajo fenómeno de La Niña, donde los deslizamientos y las inundaciones generaron grandes pérdidas a nivel regional e incomunicaron totalmente al departamento del resto del país.

En general, en una fase neutro del ENSO, a lo largo del año se esperaría que en gran parte de las cuencas Zulia y Pamplonita las condiciones climáticas (temperatura y precipitación) se encuentran cercanas al promedio, en una fase de calentamiento (El Niño), la temperatura media se comporta por encima del promedio y la precipitación acumulada por debajo del promedio, y ante una fase de enfriamiento (La Niña) la temperatura media se comporta por debajo del promedio y la precipitación acumulada por encima del promedio. Sin embargo, la intensidad y señal del ENSO no es igual en todos los trimestres, encontrándose mayor correlación para los trimestres DEF y MAM y menor correlación para SON y JJA en el caso de la temperatura media y para el caso de la precipitación acumulada mayor correlación para los trimestres DEF, JJA y SON y menor correlación para MAM. Se esperaría que durante estos trimestres se registren de forma diferenciada en el territorio los mayores problemas, sea por mayores temperaturas, sequía e incendios forestales (El Niño) o por lluvias extremas, inundaciones y deslizamientos (La Niña).

Con base en la distribución de los cambios permanentes en la temperatura y las precipitaciones y a las variaciones extremas a nivel intra-anual e interanual, se deben implementar medidas viables de mitigación y adaptación a los efectos del clima, las cuales deben vincular a todos los actores regionales públicos, privados, comunitarios, no gubernamentales y de la academia con el propósito de elaborar los

planes regionales de adaptación a los efectos del clima. Estos planes deben ser articulados con los planes de ordenamiento de cuencas hidrográficas y aunar esfuerzos para la implementación de las medidas de adaptación que se construyan de forma participativa.

Un paso fundamental hacia la adaptación que se debe dar a nivel regional está orientado a mejorar la generación y divulgación de información hidrometeorológica a nivel regional con equipos automáticos que permitan el monitoreo en tiempo real del clima. A través de esto, se pueden consolidar sistemas de alerta climática temprana participativos (SATP), que con el concurso de técnicos y comunidades pueden ayudar a preparar mejor el territorio y hacer la cuenca menos vulnerable a los efectos de la variabilidad y el cambio climático.

REFERENCIAS

- Alzate, D.F. (2014). *Señales de cambio y de variabilidad climática en las Cuencas de los Ríos Zulia y Pamplonita e identificación de medidas de adaptación potenciales*. Tesis de Maestría, Magíster en Ingeniería Ambiental. Universidad de Pamplona. Pamplona.
- Arango, D., González, C., Hernández, L., Infante, H., Murillo, S., Páez, A. y Olaya, D. (2006). *Determinación de algunas variables consideradas dentro de la etapa del diagnóstico del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Pamplonita. Fase 1*. Cúcuta: Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR).
- Becher, M. (2012). *Percepción e Impacto del Cambio Climático – Conflictos socio-ambientales en Norte de Santander*. CERCAPAZ – Componente 3: *Gestión de Conflictos Ambientales*. Stuttgart, Alemania: IP-Consult/Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional GIZ.
- Boshell, F., León, G. y Peña, A. (2011). *Metodologías para generar y utilizar información meteorológica a nivel subnacional y local frente al cambio climático*. Serie Manuales / Manual No. 4. Programa AACC – “Adaptación de la agricultura y del aprovechamiento de aguas de la agricultura al cambio climático en los Andes”. Países Andinos 2010-2013. GIZ GmbH–Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. Perú.
- Castro, L.M. y Carvajal-Escobar, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 15-25.
- Costa, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 26, 74-80.
- CPC-NOAA. (2013). Climate Prediction Center. Recuperado de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
- Gay, C., Estrada, F. y Sánchez, A. (2008). *Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Guijarro, J.A. (2011, Junio). User's guide to climatol. Islas Baleares, España.
- IDEAM. (2010). Cambio Climático en Temperatura, Precipitación y Humedad Relativa para Colombia usando Modelos Meteorológicos de Alta Resolución Panorama 2011-2100. Nota Técnica IDEAM–METEO/005-2010. Bogotá: Ed. Ruiz, J.F. Recuperado de <http://www.cambioclimatico.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=1371>
- IDEAM. (2013, mayo). Catálogo Nacional de Estaciones. Bogotá, Colombia. Disponible en www.ideam.gov.co

- Infante, H.A. (2008a). *Síntesis de Diagnóstico Cuenca del Río Zulia 2 Versión. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Zulia*. Cúcuta: CORPONOR.
- _____ (2008b). *Síntesis de Diagnóstico Cuenca del Río Pamplonita 2 Versión. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Pamplonita*. Cúcuta: CORPONOR.
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) o Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC. Recuperado de http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/les/annexessanexo-2-1.html
- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*. London, UK: Charles Griffin.
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometría*, 13, 245-259.
- Montealegre, J. y Pabón, J. (2000). La Variabilidad Climática Interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología. Colombia*, 2, 7-21. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. - Colombia.
- NOAA. (2013). ENSO Cycle: Recent Evolution, Current Status and Predictions Update prepared by Climate Prediction Center / NCEP. 7 October 2013.
- Pabón, J.D. (1998). Colombia en el ambiente global. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. En *El Medio Ambiente en Colombia* (pp. 18-37). Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Paulhus, J. Y Kohler, M. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Month. Weath. Rev.*, 80, 129-133.
- PRICC. (2011). Plan Integral Regional de Cambio Climático, Región Bogotá-Cundinamarca. Ciudades y Cambio Climático. Presentación en ppt. Recuperado de <http://ciudadesycambioclimatico.org/2011/Presentaciones/FranciscoCanal.pdf>
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.

1. Artículo de reflexión. Hace parte de procesos adelantados en el marco de la tesis de maestría: *Diseño e implementación de un sistema de alerta temprana ante eventos climáticos extremos como medida de adaptación frente a los impactos de la variabilidad y el cambio climático en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, Norte de Santander*, y de investigaciones desarrolladas en la línea de gobierno local y políticas públicas del grupo de investigación Gestión Integral del Territorio –GIT– de la Universidad de Pamplona.
2. Ingeniero Forestal. Esp. en Adaptación al Cambio Climático. Estudios de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad de Pamplona. diegoalzatev@gmail.com
3. Investigador. Máster. Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Corpoica. eorojas@corpoica.org.co
4. Ph.D. Profesor Asociado, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona. jemurb@unipamplona.edu.co
5. Ph.D. Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona. jacipt@unipamplona.edu.co

6. El Niño-La Niña Oscilación del Sur.
7. La normal climatológica o valor normal, se utiliza para definir y comparar el clima y se representa como el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica, durante un período de por lo menos 30 años. La diferencia entre el valor registrado de la variable durante un año en particular y su promedio se le conoce como anomalía.

Para citar este artículo: Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J. & Ramón, J. (2015). Cambio climático y variabilidad climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, Norte de Santander – Colombia. *Revista Luna Azul*, 39, 127-153. Recuperado de <http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=1004>