

Carolina Ramírez Carabalí

**Modelo para la predicción de semanas secas o húmedas en la zona cafetera de Caldas para la planificación de labores agrícolas**

**Model for the prediction of dry or wet weeks in the coffee zone of Caldas for the planning of agricultural work**

Septiembre de 2017

**Modelo para la predicción de semanas secas o húmedas en la  
zona cafetera de Caldas para la planificación de labores  
agrícolas**

**Model for the prediction of dry or wet weeks in the  
coffee zone of Caldas for the planning of  
agricultural work**

-Proyecto de Grado-

Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Carolina Ramírez Carabalí  
Jorge Julián Vélez Upegui, Director  
Andrés Javier Peña Quiñones, Codirector



Facultad de Ingeniería y Arquitectura

## **Prefacio**

El objetivo principal del proyecto de grado es proyectar los periodos secos y húmedos de una región agrícola de los andes del norte, a partir de índices macroclimáticos y cadenas de Markov, con el fin de proyectar las actividades agrícolas en la finca. La investigación está diseñada para encontrar un índice que permita predecir la lluvia mensual, y un método estocástico para predecir a nivel decadiario los periodos secos, húmedos y muy húmedos. La primera estrategia se basó en el estudio de la correlación con diferentes rezagos, entre algunos índices que caracterizan El Niño Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), con la lluvia del departamento de Caldas. Los análisis de correlaciones con rezago dejan ver una oportunidad para pronosticar las lluvias de la mayoría de los meses en las zonas agrícolas de los andes del norte.

En la segunda estrategia se propuso el uso de dos metodologías para dar una predicción decadiaria de periodos secos, húmedos y muy húmedos, ambas basadas en métodos estocásticos. Fue necesario realizar un análisis espacio temporal de la lluvia para encontrar regiones con patrones de lluvia similar, que permitan el uso de los métodos por región. Los resultados indicaron que los modelos basados en cadenas de Markov de primer orden son adecuados para la generación de ocurrencia de periodos secos, húmedos y muy húmedos en las zonas agrícolas de los andes del norte, sin embargo, el rendimiento de los modelos es dependiente del lugar, y debe realizarse la validación, sobre todo para estudios en nuevas regiones.

En general, se identificó que, para la proyección de las condiciones húmedas, muy húmedas y secas, mediante el uso de cadenas de Markov, es importante la adopción de un índice macroclimático específico como predictor, que tenga impacto sobre las variaciones mensuales de lluvia hasta después de tres meses.

Manizales, septiembre de 2017

*Carolina Ramírez Carabalí*

*A Dios: Padre, Hijo y Espíritu Santo, por amarme antes que yo a Él,  
y por darme la sabiduría e inteligencia para desarrollar la investigación.*

*A mis padres, Guillermo y Esperanza,  
por su comprensión, apoyo y motivación.  
A pesar de la distancia, nos une el inmenso cariño y amor.*

## **Agradecimientos**

Al Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), por el tiempo facilitado y por suministrar la información necesaria para el desarrollo del trabajo.

A los observadores meteorológicos de la red Climática de la Federación Nacional de Cafeteros, y a mis compañeros de la Disciplina de Agroclimatología de Cenicafé que realizan la validación y digitación de la información meteorológica.

A Andrés Javier Peña Q., M.Sc, un especial y profundo agradecimiento, a mi amigo y codirector, quien con su generosa dirección y aportes guio este trabajo de investigación y me alentó a terminarlo, por compartirme su gran conocimiento, por su constante apoyo e insistencia.

A Jorge Julián Vélez U., Ph.D., por su orientación académica y apoyo en la realización del proyecto de grado.

A Álvaro Jaramillo R., M.Sc, y Ninibeth Sarmiento H., Ingeniera Agrícola, por su asesoría y enseñanzas en el desarrollo de la investigación.

A Juan Carlos García L., Ph.D., por el tiempo facilitado y el apoyo para la culminación de esta investigación.

A Rubén Medina R., M.Sc., y Lina Díaz B., Esp., asesores estadísticos.

A la herramienta TOS (Tree of Science), creada por Robledo, Osorio, y López, para la búsqueda de las referencias bibliográficas.

# Contenido

1. Buscando un índice para predecir la lluvia mensual en una región agrícola de los andes del norte (Caldas, Colombia) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.1 Introducción .....	2
1.2 Metodología .....	7
1.2.1 Características de los datos.....	7
1.2.2 Caracterización del efecto de los indicadores sobre la lluvia.....	8
1.2.3 Caracterización espacial de las correlaciones.....	9
1.3 Resultados .....	11
1.3.1 Asociación lineal temporal y espacial entre tres indicadores y la lluvia mensual.....	11
1.3.2 Índices con mejor correlación para cada mes.....	15
1.4 Discusión y Conclusiones .....	23
1.5 Bibliografía .....	25
2. Uso de dos modelos estocásticos para la generación de periodos decadiarios secos, húmedos y muy húmedos en tres estaciones de la zona cafetera de Caldas, Colombia. ....	30
2.1 Introducción .....	31
2.2 Área de estudio y datos .....	33
2.2.1 Variación espacio temporal de la lluvia .....	34
2.2.2 Prueba de homogenización normal estándar .....	36
2.2.3 Llenado de datos faltantes .....	37
2.2.4 Período seco, húmedo y muy húmedo.....	38
2.3 Metodología .....	39
2.4 Resultados .....	43
2.4.1 Variación espacio temporal de la lluvia .....	43
2.4.2 Prueba de Homogenización Normal Estándar.....	47
2.4.3 Llenado de datos faltantes .....	49
2.4.4 Período seco, húmedo y muy húmedo.....	52
2.4.5 Comparación entre Suemulador y Modelo de cadena de Markov de primer orden y tres estados. ....	55
2.5 Discusión y conclusiones .....	61
2.6 Bibliografía .....	62

**1. Buscando un índice para predecir la lluvia mensual en una región agrícola de los andes del norte (Caldas, Colombia).**

**Looking for an index to predict the monthly rainfall in an agricultural region of the northern Andes (Caldas, Colombia)**

*Carolina Ramírez C., Jorge J. Vélez U., Andrés J. Peña Q.*

**Resumen.**

Aunque varios autores han establecido que diferentes índices que caracterizan fenómenos oceánicos y atmosféricos en ultramar tienen relación con el comportamiento del tiempo y el clima en la región andina colombiana, la aplicación de este conocimiento es casi nulo. Esta falencia está asociada básicamente a dos situaciones: La primera es la incertidumbre representada por la escasa cantidad de información meteorológica existente para explicar eventos o anomalías climáticas de baja frecuencia; la segunda es la idea establecida de que el Índice Oceánico El Niño (ONI, por sus siglas en Inglés) es el único índice capaz de describir la variación de los valores de los elementos del clima a escala mensual. Este trabajo trata de reducir las incertidumbres antes mencionadas a través de un estudio comparativo que permite determinar la idoneidad espacial (por sitio) y temporal (por mes) de diferentes índices y moduladores del clima en una región agrícola del norte de los andes. Los resultados muestran una mejor correspondencia entre el clima de la región y los índices que caracterizan ENOS hasta con tres meses de rezago. No obstante, ONI no es siempre el mejor predictor de la lluvia mensual. Esto permite pensar que algunos índices se podrían utilizar con éxito para

pronosticar las lluvias de la mayoría de los meses en las zonas agrícolas de los andes del norte.

Palabras Clave: Clima, Lluvia, Agricultura climáticamente inteligente, Región Andina, Colombia.

### **Abstract.**

Although several authors have established that different indices that characterize oceanic and atmospheric phenomena overseas are related to the behavior of weather and climate in the Colombian Andean region, the application of this knowledge is almost nil. This shortcoming is basically associated to two situations: The first is the uncertainty represented by the scarce amount of existing meteorological information to explain events or low frequency climate anomalies; the second is the established idea that the El Niño Ocean Index (ONI) is the only index capable of describing the variation of the values of climate elements on a monthly basis. This work tries to reduce the aforementioned uncertainties through a comparative study that allows to determine the spatial (by site) and temporal (by month) suitability of different indices and climate modulators in an agricultural region of the north of the Andes.

**Keywords:** Climate, Rain, Climate-smart agriculture, Andean Region, Colombia.

## **1.1 Introducción**

En los andes colombianos o andes del norte, por su posición geo-astronómica, la variación en los acumulados mensuales de lluvia se atribuyen al doble paso anual de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) (Hastenrath, 2002, 1990, n.d.; Portig, 1965; Riehl, 1979; Waylen et al., 1996), sistema predominantemente del Este que acarrea gran cantidad de humedad. Aunque la ZCIT puede describir el comportamiento temporal de las lluvias, el agua

precipitada total anual está determinada por el efecto de las montañas como barreras al flujo horizontal de aire (Markowski y Richardson, 2010). En este sentido, en dicha región se pueden encontrar desde zonas secas, con registros medios anuales inferiores a 600 mm, hasta zonas muy húmedas, con precipitaciones medias anuales superiores a los 4500 mm, que comparten el mismo patrón de distribución intra-anual de lluvias. Dicho patrón consiste en la alternancia de períodos húmedos (abril a mayo y octubre a noviembre) y períodos secos o menos húmedos (enero a febrero y julio a agosto) separados por épocas de transición (Guzman M y Baldion R, 1997; Jaramillo R. y Chaves C., 2000; Leon A. et al., 2000; Trojer, 1959). Esta forma de distribución de la lluvia a través del año determinó el desarrollo de calendarios agrícolas que, en el caso de los cultivos semestrales determinaba épocas de siembra durante los períodos lluviosos, lo que garantiza humedad en el suelo, y periodos de cosecha durante las épocas secas, garantizando niveles óptimos de humedad al momento de cosechar los granos. Sin embargo, durante algunos años el patrón pluvial tiende a modificarse y el total anual de lluvias puede variar significativamente con respecto a los valores medios. Dichos cambios se atribuyen a otro tipo de factores, entre los que se encuentra el efecto de los océanos, las explosiones volcánicas y variaciones a nivel solar sobre los patrones de circulación de mediana y gran escala. Según Lau y Nath (1994) y Webster y Lukas (1992), en un planeta cuya superficie es mayoritariamente agua, los océanos están en capacidad de modular las condiciones del clima. En ese sentido, el océano Pacífico, con un volumen de alrededor de 702 millones de kilómetros cúbicos de agua, se ha reportado como el principal generador de variabilidad en los datos anuales de lluvia en diferentes lugares del mundo (Hu et al., 2005; Kumar et al., 1999; Mesa et al., 1997; Ropelewski y Halpert, 1987; Wu et al., 2003).

A diferencia de lo que ocurre con la ZCIT, que es un sistema que tiene movimiento, y la baja presión presente en el mismo afecta las zonas sobre las que transita, el efecto de los fenómenos que se suceden sobre el Océano Pacífico son un poco más complejos. Dicha complejidad radica en que ellos no solo afectan el clima de la zona sobre la que se presentan, sino que afectan los patrones de circulación de la atmósfera a escala macro y meso. El cambio en dichos esquemas genera cambios climáticos que dependen de la región analizada, por lo que generalmente se habla de efectos tele-conectados para referirse a las anomalías del clima relacionadas con la presencia de tales fenómenos. Dos generadores de dicha variabilidad son El Niño Oscilación del Sur (ENOS) (Ropelewski y Halpert, 1987; Shukla y Mooley, 1987; Yarnal, 1985) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) (Mantua et al., 1997; Minobe, 1997). ENOS es un término utilizado para describir un fenómeno de más baja frecuencia que la ZCIT (una vez cada dos a cuatro años) (Diaz y Markgraf, 1992; Glantz et al., 1991; Philander, 1989). El Niño es la componente oceánica, relacionada con cambios en la temperatura superficial del mar, mientras que la Oscilación del Sur es la componente atmosférica y está asociada con cambios en la presión atmosférica al sureste y suroeste de la cuenca del Pacífico (Allan et al., 1997; Philander, 1989; Ropelewski y Halpert, 1987). La ODP se identifica como una anomalía de menor frecuencia que ENOS (20 a 30 años), que hace referencia a las variaciones en la temperatura superficial del océano en el noreste y la región tropical, pero que se limita para la región ecuatorial en el Pacífico Oriental, y se muestra significativo en el Pacífico Norte extratropical (Zhang et al., 1997).

Aunque las teleconexiones entre la lluvia acumulada a diferentes escalas en diferentes localidades de los Andes colombianos y la ODP y ENOS han sido descritas en amplitud y profundidad (Poveda et al., 2002; Tootle et al., 2008; Montealegre B y Pabón C., 2000;

Poveda et al., 2006; Cabarcas et al., 2013; Jaramillo y Arcila., 2009a, 2009b; Poveda y Mesa, 1996; Puertas Orozco y Carvajal Escobar, 2011), incluyendo análisis de las interacciones entre las mismas (Verdon y Franks, 2006), aun no se cuenta con sistemas que permitan hacer una predicción climática que satisfaga las necesidades de los empresarios que se dedican a la generación de biomasa a partir de energía lumínica. De hecho, aunque en la actualidad se cuenta con varios índices y variables para caracterizar el efecto de ENOS, la mayor parte de los tomadores de decisiones utilizan el Índice Oceánico El Niño (ONI), por ser el indicador oficial de la condición prevaleciente de ENOS (NOAA, n.d.), y por su facilidad de interpretación. El ONI se define como la anomalía de la temperatura de la superficie del Océano Pacífico en la región El Niño 3.4 (5 ° S-5 ° N; 170 ° W-120 ° W) con respecto a un determinado período de referencia (1971 -2010) (Tootle et al., 2008; Trenberth, 1997). No obstante, además del ONI existen otros índices que caracterizan el ENOS (Tabla 1). De hecho, algunos índices pueden combinarse para crear índices compuestos, como es el caso de la serie Bivariada ENOS (BEST) (Smith y Sardeshmukh, 2000). Además de lo anterior, generalmente los estudios no consideran efectos de rezago que pueden hacer que los valores actuales de los índices que describen los procesos de variabilidad climática tengan desajustes temporales.

*Tabla 1.1. Algunos índices que caracterizan el Océano Pacífico. Fuente: Elaboración Propia.*

<b>Sigla</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cita Bibliográfica</b>
<b>ONI</b>	Índice Oceánico El Niño (5N-5S, 170W-120W)	Anomalía del promedio de la TSM en la región del Pacífico Tropical Central Oriental. El ONI utiliza la media de 3 meses consecutivos.	(Huang et al., 2014)

<b>Sigla</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cita Bibliográfica</b>
<b>Niño 1+2</b>	Temperatura superficial extrema del Pacífico tropical correspondiente con la región de América del Sur (0-10S, 90W-80W)	Anomalía del promedio de la TSM en la región de América del Sur.	(Trenberth, 1997), (Reynolds et al., 2002)
<b>Niño 3</b>	Temperatura superficial del Pacífico Tropical Oriental (5N-5S, 150W-90W)	Anomalía del promedio de la TSM en la región del Pacífico Tropical Oriental.	(Trenberth, 1997), (Reynolds et al., 2002)
<b>Niño 3.4</b>	Temperatura superficial del Pacífico Tropical Central Oriental (5N-5S, 170W-120W)	Anomalía del promedio de la TSM en la región del Pacífico Tropical Central Oriental.	(Trenberth, 1997), (Reynolds et al., 2002)
<b>Niño 4</b>	Temperatura superficial del Pacífico Tropical Central (5N-5S, 160E-150W).	Anomalía del promedio de la TSM en la región del Pacífico Tropical Central.	(Trenberth, 1997), (Reynolds et al., 2002)
<b>TNI</b>	Índice de Evolución de El Niño.	Calculado a partir de las diferencias entre las anomalías de la TSM normalizadas de las regiones El Niño 1+2 y Niño 4.	(Trenberth y Stepaniak, 2001)
<b>BEST</b>	Bivariate ENSO Timeseries.	Calculado a partir de la combinación del índice estandarizado SOI y la serie estandarizada de la SST del Niño3.4	(Smith y Sardeshmukh, 2000)

Se ha demostrado que la lluvia en Colombia se rige principalmente por teleconexiones ENOS, pero en segundo lugar se encuentra reforzada por otros moduladores macroclimáticos de frecuencia interdecadal en el Atlántico (Paegle y Mo, 2002; Poveda, 2004), como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que representa la alteración de la masa atmosférica entre las regiones subtropical y subpolar del Océano Atlántico Norte (Walker, 1924). La

NAO tiene fase negativa y positiva, y no presenta un cuasiperiodo definido como el ENOS. Su influencia sobre Sur América es débil (Paegle y Mo, 2002), pero estudios como los de Díaz y Villegas (2015), Poveda et al. (2002) y Gíl et al. (1998), donde estudian la teleconexión entre la NAO y la hidrología de Colombia, muestran relaciones discretas, oscilantes y en algunos casos significativas, asociándolas a la intensidad de los vientos alisios del noreste que penetran desde el Océano Atlántico tropical Norte y del Mar Caribe.

Debido a esta necesidad por esquemas de predicción del clima que reduzcan el riesgo de que los productores agrícolas sufran pérdidas económicas por efecto del exceso y/o déficit de lluvias, se utilizó datos de clima de la zona montañosa del departamento de Caldas para caracterizar la variación espacial y temporal de la relación existente entre cuatro indicadores que caracterizan tres generadores de variabilidad climática y la lluvia mensual. Este departamento es uno de los principales productores de café (FNC, n.d.) y los efectos de los cambios en los patrones intra anuales de lluvia, así como la cantidad de lluvia a escala mensual trascienden sobre el rendimiento del cultivo (Ramírez B. et al., 2013). Dicho efecto se debe a que el café, como otras especies perennes, sincroniza sus etapas fenológicas con el comportamiento de las variables climáticas, en este caso de la lluvia (Jaramillo R., A. et al., 2011; Peña Q. et al., 2013; Ramirez B. et al., 2014, 2013). Por lo tanto, el objetivo de este estudio es encontrar uno o varios índices que puedan ser utilizados para predecir la lluvia mensual en la zona cafetera de Caldas, Colombia.

## **1.2 Metodología**

### **1.2.1 Características de los datos**

Se utilizaron los datos de precipitación acumulada mensual de 16 estaciones meteorológicas ubicadas en el departamento de Caldas (Figura 1.1), las cuales hacen parte de la Red

Meteorológica Convencional administrada por la disciplina de Agroclimatología del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). La totalidad de estaciones seleccionadas cuentan con una serie histórica de más de 30 años. Las series mensuales de los índices que se consideran en este trabajo (ONI, BEST, ODP y NAO) se obtuvieron de la base de datos del Climate Prediction Center (CPC) de la NOAA. Específicamente para ONI, se utilizó la versión más actual, ERSSTv4.

### **1.2.2 Caracterización del efecto de los indicadores sobre la lluvia**

Se utilizaron regresiones lineales para caracterizar el efecto de cada uno de los índices sobre el acumulado mensual de lluvia. El grado de asociación lineal entre cada par de variables se determinó con base en el coeficiente de correlación ( $R$ ) de Pearson, asimismo se determinó el sentido de la pendiente para determinar si la relación es positiva o negativa. El índice de correlación indica en qué grado dos variables  $x$  e  $y$  fluctúan simultáneamente, es decir, cuando la correlación es positiva el valor de  $y$  aumenta al incrementar el valor de  $x$ , y la correlación es negativa cuando ocurre lo contrario. Un coeficiente  $R = 0$  indica, en cambio, una ausencia absoluta de correlación lineal. La estimación de las correlaciones se realizó para diferentes rezagos (0 a 3 meses), considerando que los indicadores de variabilidad climática describen eventos que anteceden a los eventos de precipitación en la región de estudio. Para determinar la significancia estadística de las correlaciones se realizó una prueba  $F$ . Se consideró que existe relación lineal significativa cuando el nivel crítico  $p$  fue menor que el nivel de significancia establecido en 5%. Este análisis permite identificar, para cada mes y estación, el indicador que tiene una mejor correlación con la lluvia mensual. Los análisis estadísticos de este estudio se llevaron a cabo en RStudio 1.0.136 (RStudio Team, 2015) y R 3.3.3 (R Core Team, 2000), utilizando el paquete “plyr” (Wickham, 2016a), y por medio del

paquete “ggplot2” y “ggthemes” (Arnold, 2017; Wickham, 2016b) se construyeron los mapas de calor a partir de la matriz de correlaciones. Dichos mapas tienen la capacidad de describir la relación entre las variables analizadas a nivel espacial y temporal (Wilkinson and Friendly, 2009). En este caso, los rezagos se indican en el eje x, el primer mes indica el mes usado en la correlación para el valor del índice, mientras que el segundo mes indica el mes usado para el valor de la lluvia. De esta forma, Ene-Mar representa la correlación entre el valor del índice durante el mes de enero y la lluvia acumulada del mes de marzo. Además, para identificar efectos asociados a la latitud, las estaciones están ordenadas de Norte a Sur, siendo GUA la estación que está ubicada más al Norte y NAR la que está ubicada más al Sur.

### **1.2.3 Caracterización espacial de las correlaciones**

Para facilitar el análisis de los datos, se elaboraron mapas mensuales en los que se asigna a cada punto del espacio o estación el nombre del índice que mejor correlación tiene con la lluvia de cada estación. El número que acompaña al índice indica el mes del índice que mejor correlaciona con la lluvia. El análisis de resultados se realizó de acuerdo a las temporadas húmedas y secas en el año.

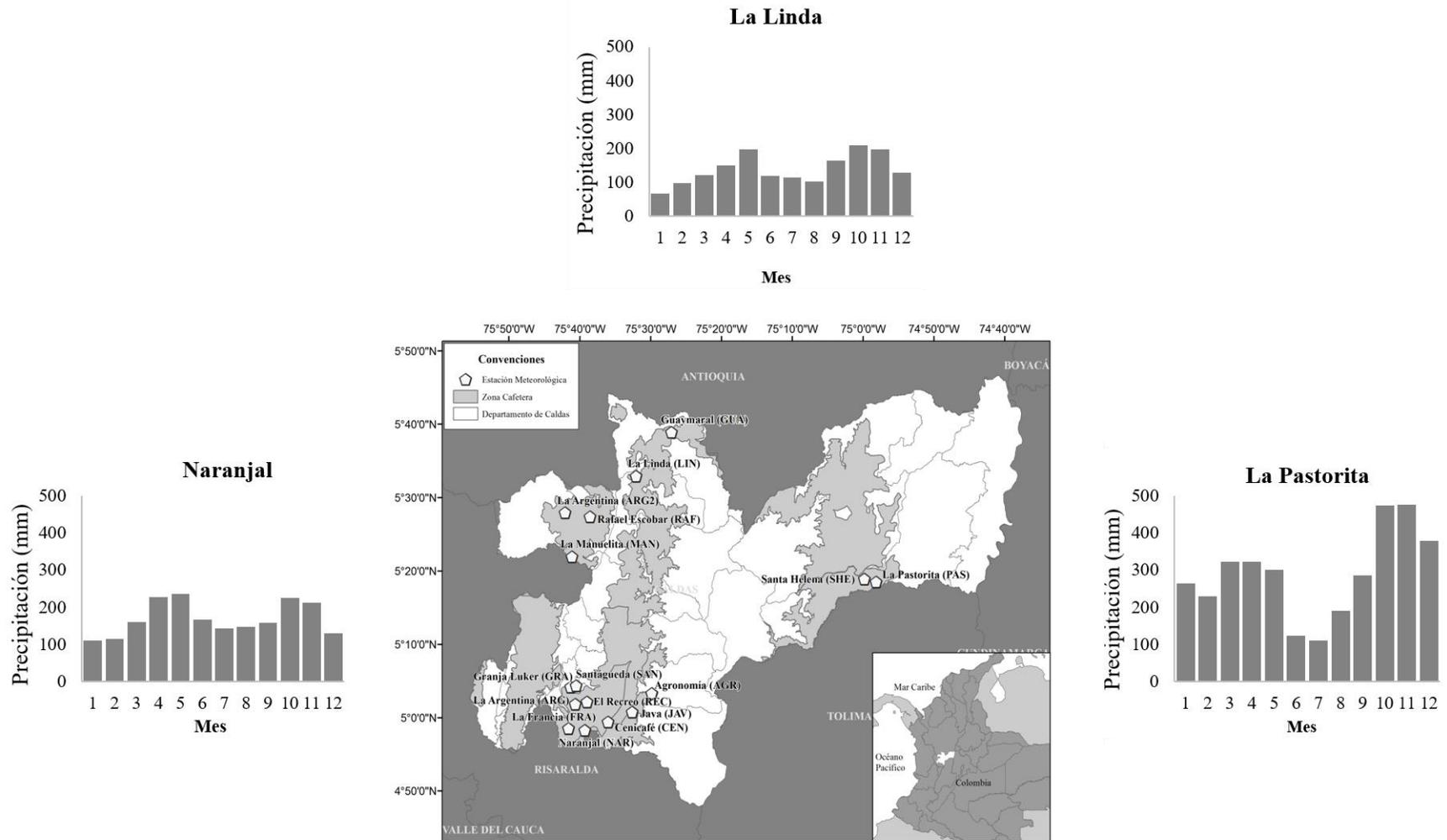


Figura 1.1. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. En la periferia se encuentra la distribución histórica de la lluvia en algunas estaciones representativas. Fuente: Elaboración propia.

### **1.3 Resultados**

#### **1.3.1 Asociación lineal temporal y espacial entre tres indicadores y la lluvia mensual.**

##### **Correlaciones con el BEST**

Los valores del índice BEST están asociados con los valores de precipitación mensual de las localidades bajo estudio. Este índice puede explicar buena parte de la cantidad total de precipitación mensual del trimestre comprendido entre noviembre y enero. Durante dicha época las relaciones son negativas en general, pero especialmente significativas durante noviembre y diciembre. Durante el periodo comprendido entre abril y mayo, así como en octubre las correlaciones son bajas, poco significativas y en algunos casos oscilantes entre positivas y negativas dependiendo de la localidad. La otra época en la que predominan correlaciones significativas es durante el mes de agosto, periodo en el que estas son predominantemente negativas. En términos generales los rezagos no determinan incrementos en la significancia de las correlaciones de los meses en los que el índice y la lluvia están poco correlacionados sin aplicar ningún rezago; pero si permite determinar el comportamiento de la precipitación acumulada con hasta tres meses de anticipación en algunas localidades (Figura 1.2).

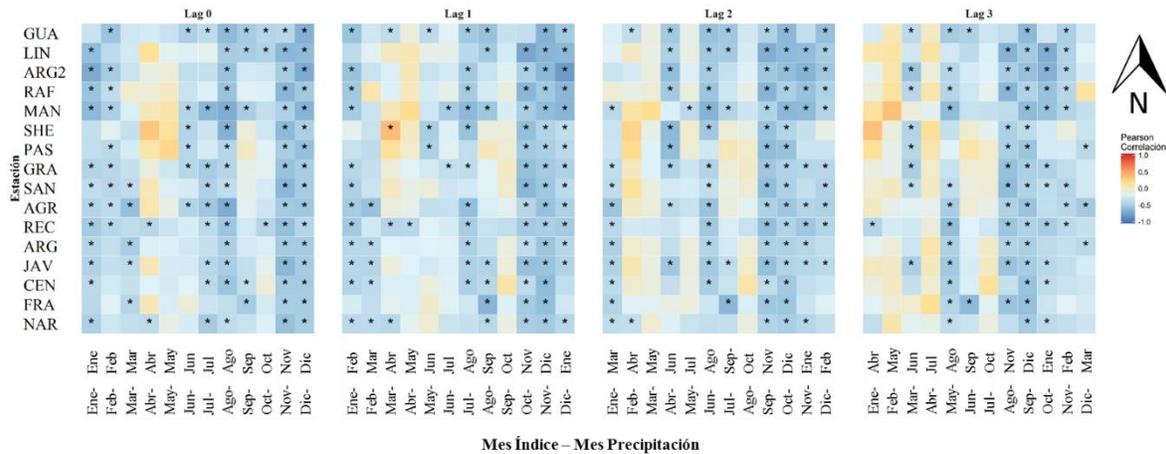


Figura 1.2. Mapa de Calor que representa la correlación obtenida entre el índice BEST y la lluvia para cada mes y estación meteorológica. (\*) Indica significancia estadística al 5%. Fuente: Elaboración propia.

### Correlaciones con ONI

Este índice tiene una relación negativa con la lluvia mensual en general, pero significativa solo en algunas épocas del año. Los valores de correlación de este índice con la lluvia acumulada de los meses de enero, febrero, agosto, noviembre y diciembre, es alta tanto para el análisis con rezago 0 hasta 3. Sin embargo, a partir del segundo rezago las correlaciones son más débiles y menos significativas. Se observa también que las correlaciones entre el índice ONI y la lluvia del mes de marzo y junio, desde 0 hasta 3 rezagos, presentan correlaciones de signo negativo y con significancia estadística. No obstante, existe una diferenciación geográfica en dicho comportamiento, es así como las lluvias de las estaciones del sur de Caldas tienen relación significativa con el índice sólo durante marzo, mientras que en el norte de Caldas la significancia se presenta durante el mes de junio.

Las estaciones ubicadas al oriente de Caldas, especialmente La Pastorita, presentan una correlación significativa con el ONI para los 4 rezagos analizados en los meses de junio, noviembre y diciembre. En la estación Santa Helena los valores de correlación son positivos y significativos en abril cuando se analizó rezago 2 y 3, esto indica que cuando la temperatura

del Océano Pacífico aumenta con relación a su valor histórico en los meses de enero y febrero, las lluvias en ésta estación también aumentan, mientras que cuando la temperatura del Océano disminuye, las lluvias también disminuyen (Figura 1.3).

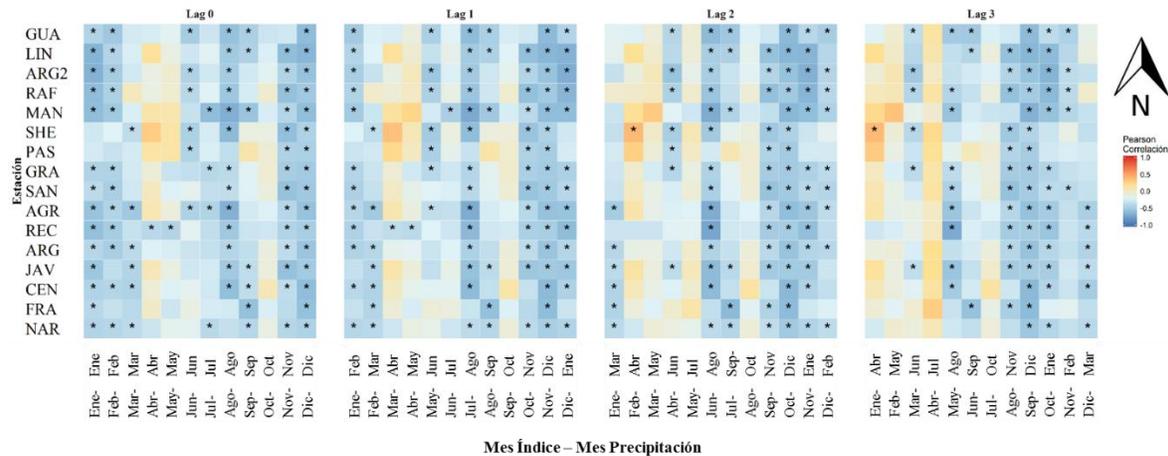


Figura 1.3. Mapa de calor que representa la correlación obtenida entre el índice ONI y la lluvia para cada mes y estación meteorológica. (\*) Indica significancia estadística al 5%.

Fuente: Elaboración propia.

## Correlaciones con ODP

La relación entre este índice y la lluvia de Caldas revelan en su mayoría, tanto para el análisis con rezago 0 hasta 3, correlaciones positivas. No obstante, sobresalen correlaciones significativas en algunas estaciones, donde la lluvia depende significativamente de este índice, especialmente durante marzo, agosto, noviembre y diciembre para todos los rezagos. El efecto es más notorio cuando el índice antecede dos meses a la precipitación del mes de diciembre, donde se obtuvo una correlación negativa significativa para el 100% de las estaciones analizadas. Es importante estudiar los mecanismos físicos de la asociación en esos meses particularmente. Sobresalen las estaciones La Linda y La Manuelita, ubicadas sobre la cordillera occidental vertiente oriental, las cuales presentan una relación significativa en 4

y 5 meses con la ODP, respectivamente, cuando la correlación se realizó simultánea con la lluvia (Figura 1.4).

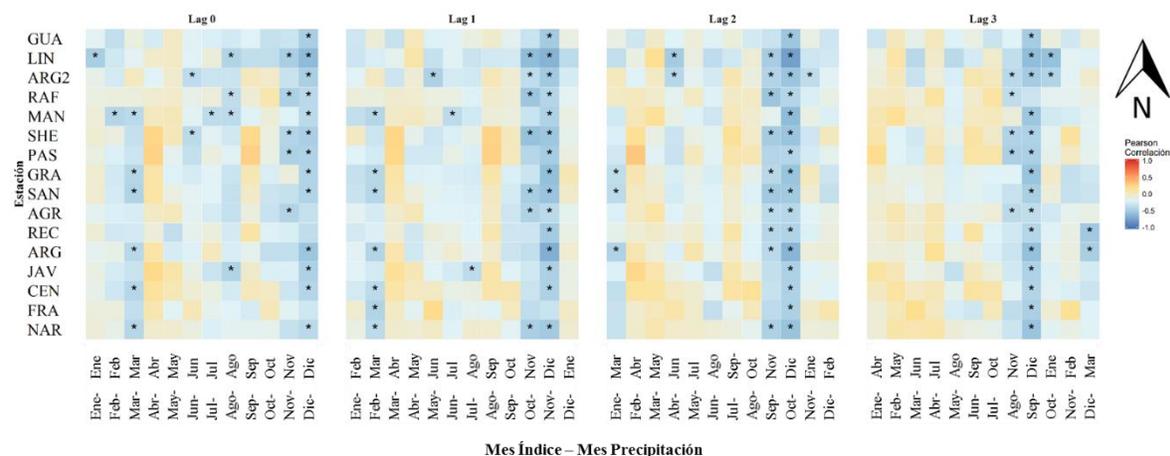


Figura 1.4. Mapa de calor que representa la correlación obtenida entre el índice ODP y la lluvia para cada mes y estación meteorológica. (\*) Indica significancia estadística al 5%.

Fuente: Elaboración propia.

## Correlaciones con la NAO

En general, las correlaciones entre este índice y la precipitación para los 4 análisis de rezago realizados, son positivas y no tienen significancia estadística. Se destacan tres estaciones con correlación positiva y significancia estadística, entre el índice y la precipitación en el mes de octubre, sin embargo, no se muestra un patrón coherente que esté asociado con la ubicación de las estaciones meteorológicas. En el rezago 1 continúan las correlaciones positivas, pero sin significancia estadística, pero curiosamente en el rezago 2, las correlaciones que eran positivas en el rezago 0 y 1, pasan a ser negativas y significativas en la precipitación de los meses de mayo y junio. Las correlaciones negativas y significativas continúan en el mes de junio para algunas estaciones cuando se hizo el análisis para un rezago de 3 meses (Figura 1.5).

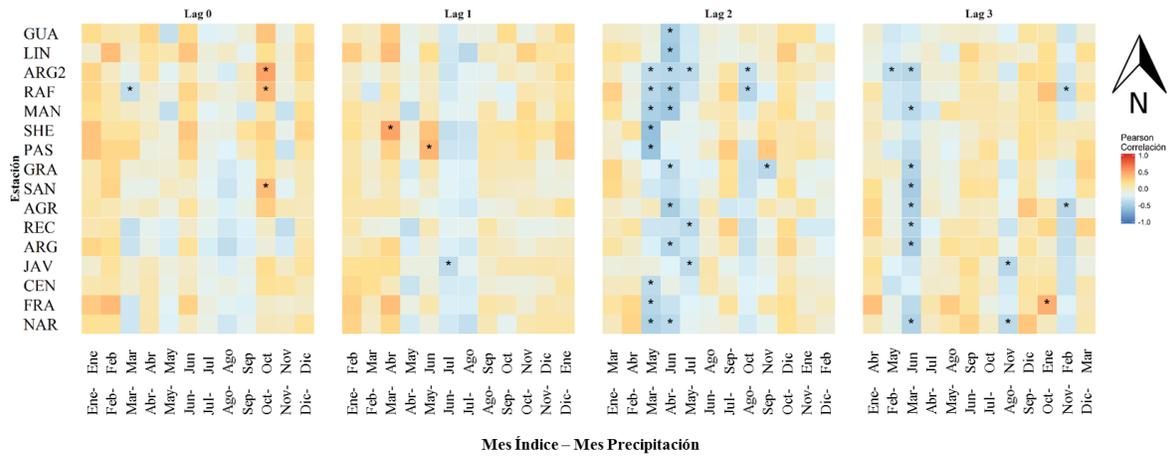


Figura 1.5. Mapa de calor que representa la correlación obtenida entre el índice NAO y la lluvia para cada mes y estación meteorológica. (\*) Indica significancia estadística al 5%.

Fuente: Elaboración propia.

### 1.3.2 Índices con mejor correlación para cada mes

#### Primera temporada seca del año (Diciembre – Enero – Febrero)

Los resultados muestran que las precipitaciones de la temporada seca entre diciembre y febrero, en la zona central cafetera, puede estar influenciada por los índices BEST, ONI, NAO y ODP como se ilustra en la Figura 1.6. El resultado más representativo de esta temporada se observa en 7 estaciones donde el índice ODP de octubre y noviembre puede influir sobre la lluvia del mes de diciembre, sin embargo, a pesar de presentar correlaciones significativas con la lluvia, carecen de estabilidad, lo que influye en limitada capacidad predictiva sobre la lluvia en esas estaciones (Figura 1.6).



las del centro hacia el norte de Caldas correlacionan mejor con el índice BEST, incluso hasta con rezago de dos meses para algunas estaciones (Figura 1.6).

Para el mes de febrero se pierde ese patrón geográfico encontrado en el mes de enero, pero continúan los índices BEST y ONI, hasta con rezago de dos meses, como los de mejor explicación de las lluvias de la temporada. Este es un hallazgo interesante dado que puede haber habilidad predictiva con ambos índices (Figura 1.6).

En este estudio se identificó que la estación La Francia, ubicada al sur de Caldas, al contrario de las demás estaciones, presentó mejor valor de correlación con el índice NAO y las lluvias de los meses de enero y febrero. Aunque con la lluvia del mes de febrero no se obtuvo significancia estadística, si se obtuvo para el mes de enero, ya que ésta puede estar influenciada por las condiciones del Océano Atlántico Norte del mes de octubre (3 meses antes). A pesar de que estos resultados difieren de algunos estudios publicados, son consistentes con Díaz y Villegas (2015), que en su estudio obtuvieron relaciones directas entre la NAO y la precipitación durante Diciembre – Enero – Febrero.

### **Primera temporada húmeda del año (Marzo – Abril – Mayo)**

Se detectó que los índices BEST y ONI, en la mitad de las estaciones analizadas, presentaron una relación significativa con la lluvia de marzo, mes de transición de la temporada seca a la húmeda. Es interesante observar que los índices ODP y NAO juegan un papel importante con la lluvia del mes de marzo para el resto de las estaciones analizadas. Especialmente ODP presenta una mejor correlación. Estos resultados evidencian que los índices que caracterizan las condiciones del Océano Pacífico ecuatorial y norte correlacionan mejor hasta con rezago de 3 meses (Figura 1.7).

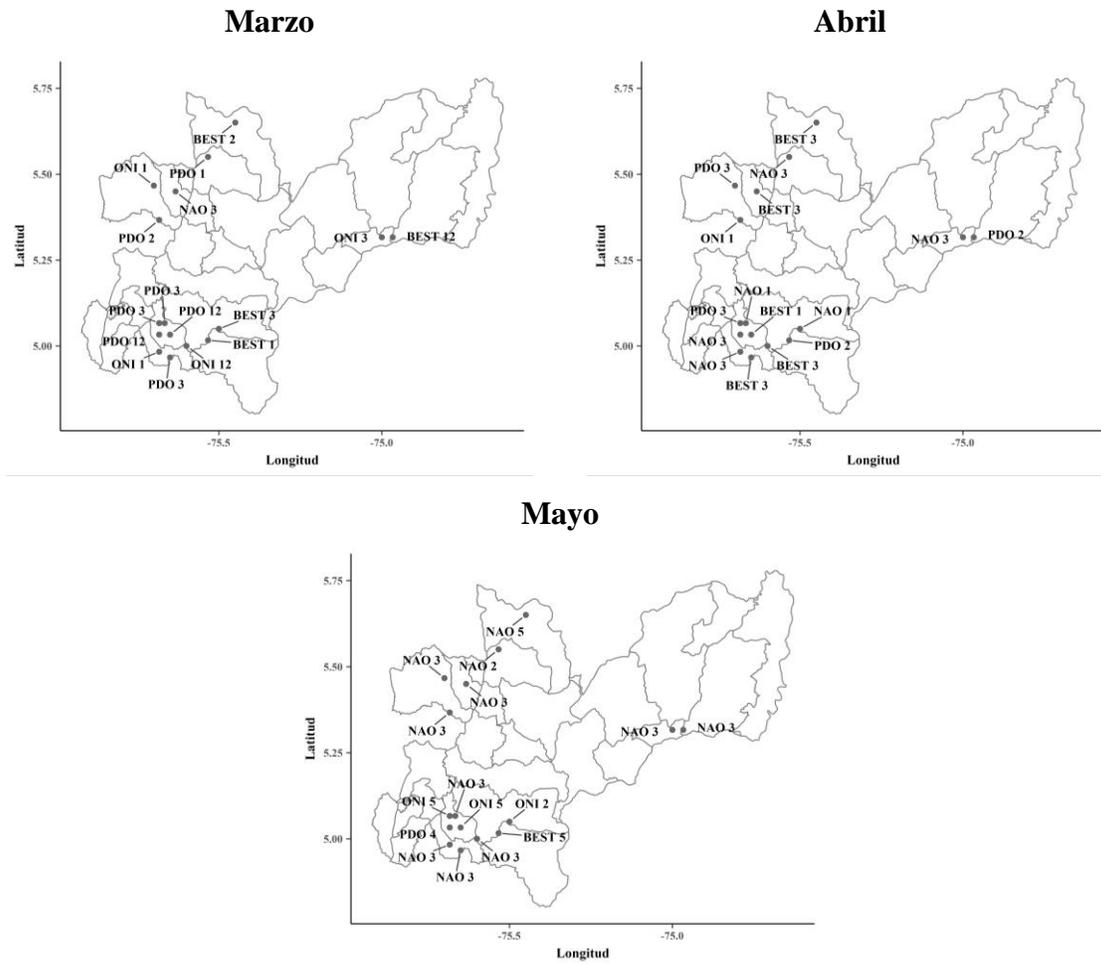


Figura 1.7. Índice-Mes que mejor correlacionó con los meses de marzo, abril y mayo. El número que precede a la sigla del índice predictor, corresponde al mes con el cual se presentó la mejor correlación. Fuente: Elaboración propia.

En abril se encontró que, en 6 estaciones, las mayores correlaciones son de signo positivo y se presentan entre el índice NAO y la lluvia, aunque tan solo en la estación Santa Helena hubo significancia estadística (Figura 1.5). El resto de las estaciones correlaciona mejor con los índices que caracterizan el Océano Pacífico, con predominio el índice BEST sobre el ONI. Se destacan los datos de correlación que se pueden observar entre el índice ODP con la lluvia de abril de 4 estaciones (Figura 1.7).

De acuerdo a los resultados, la lluvia de abril correlaciona mejor hasta con rezago de 1 mes en la mayoría de las estaciones.

En el mes de mayo, NAO es representativo dado que en 11 estaciones es el que mejor correlación presenta con la lluvia, especialmente el índice NAO con rezago de 1 mes. En el mes mayo permanece constante la débil relación entre la lluvia con los índices BEST, ONI y ODP, y es claramente revelada por el análisis de correlación de Pearson. No obstante, es importante destacar que esas 5 estaciones que no correlacionaron mejor con NAO, están relativamente cerca entre ellas, y ubicadas en los municipios de Palestina y Manizales (Figura 1.7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

### **Segunda temporada seca (Junio - Julio – Agosto)**

Con respecto a la lluvia del mes de junio, se resalta que la mitad de las estaciones correlaciona mejor con el índice BEST, mientras que la otra mitad correlaciona mejor con NAO, ambos índices se relacionan mejor hasta con rezago de tres meses. No se distingue un patrón geográfico que este asociado a estos resultados, porque incluso dos estaciones que son muy cercanas (Menos de 2 km de distancia) correlacionan con diferente índice (Figura 1.8).

En el mes de julio se mantiene esa relación entre la lluvia con los índices BEST y NAO, específicamente el índice BEST se relaciona mejor con rezago cero y la NAO hasta con rezago de dos meses. Las mejores correlaciones predominan con el índice BEST en el sur de Caldas, y con la NAO las estaciones del centro y norte de Caldas (Figura 1.8).

En agosto, las lluvias de las estaciones del sur de Caldas correlacionan mejor con el índice ONI, y la relación es mejor con rezago de uno y dos meses, a excepción de dos estaciones que correlacionan mejor con el índice BEST de mayo y agosto. En cambio, las estaciones del centro y norte de Caldas, correlacionan mejor con el índice BEST hasta con rezago de dos meses, y solo dos estaciones de estas zonas correlacionan mejor con el índice ONI de junio y julio (Figura 1.8).

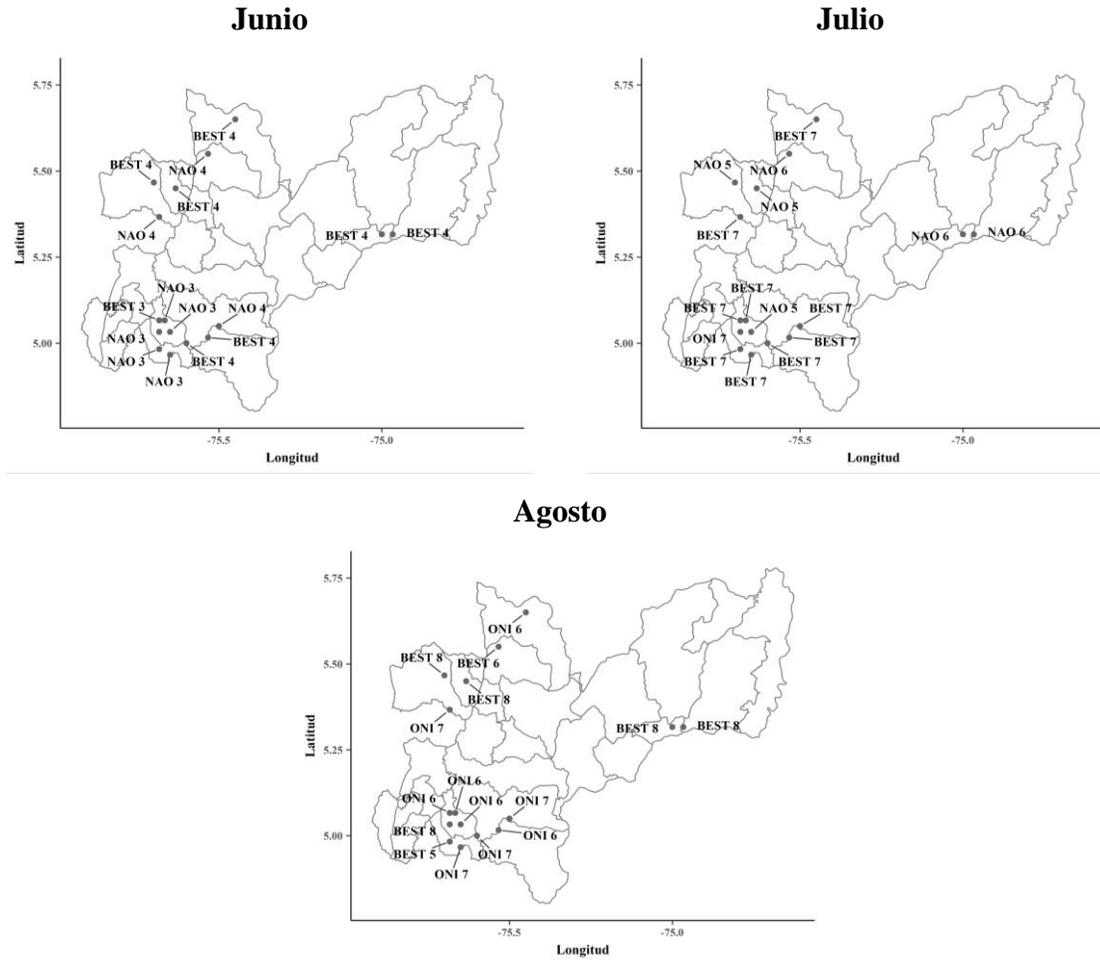


Figura 1.8. Índice-Mes que mejor correlacionó con los meses de junio, julio y agosto. El número que precede a la sigla del índice predictor, corresponde al mes con el cual se presentó la mejor correlación. Fuente: Elaboración propia.

### Segunda temporada húmeda (Septiembre – Octubre - Noviembre)

En el mes de septiembre, se encontró una correlación significativa entre la lluvia de 14 estaciones con los índices BEST y ONI, hasta con rezago de 3 meses, aunque es notable que el índice BEST de agosto es el que mejor correlaciona con la lluvia de septiembre (Figura 1.9). También se observa que la zona del oriente de Caldas presenta una mejor correlación con los índices ODP de agosto y la NAO de julio (Figura 1.9).

Las lluvias del mes de octubre de las estaciones del departamento de Caldas no presentaron una correlación significativa con alguno de los índices, a excepción de las estaciones La Linda y Guaymaral ubicadas al Norte del departamento, que presentaron una correlación significativa con el índice BEST del mismo mes (Figura 1.9).

En el mes de noviembre, el 100% de las estaciones analizadas presentan correlaciones negativas y significativas con el índice BEST hasta con rezago de tres meses (Figura 1.9).

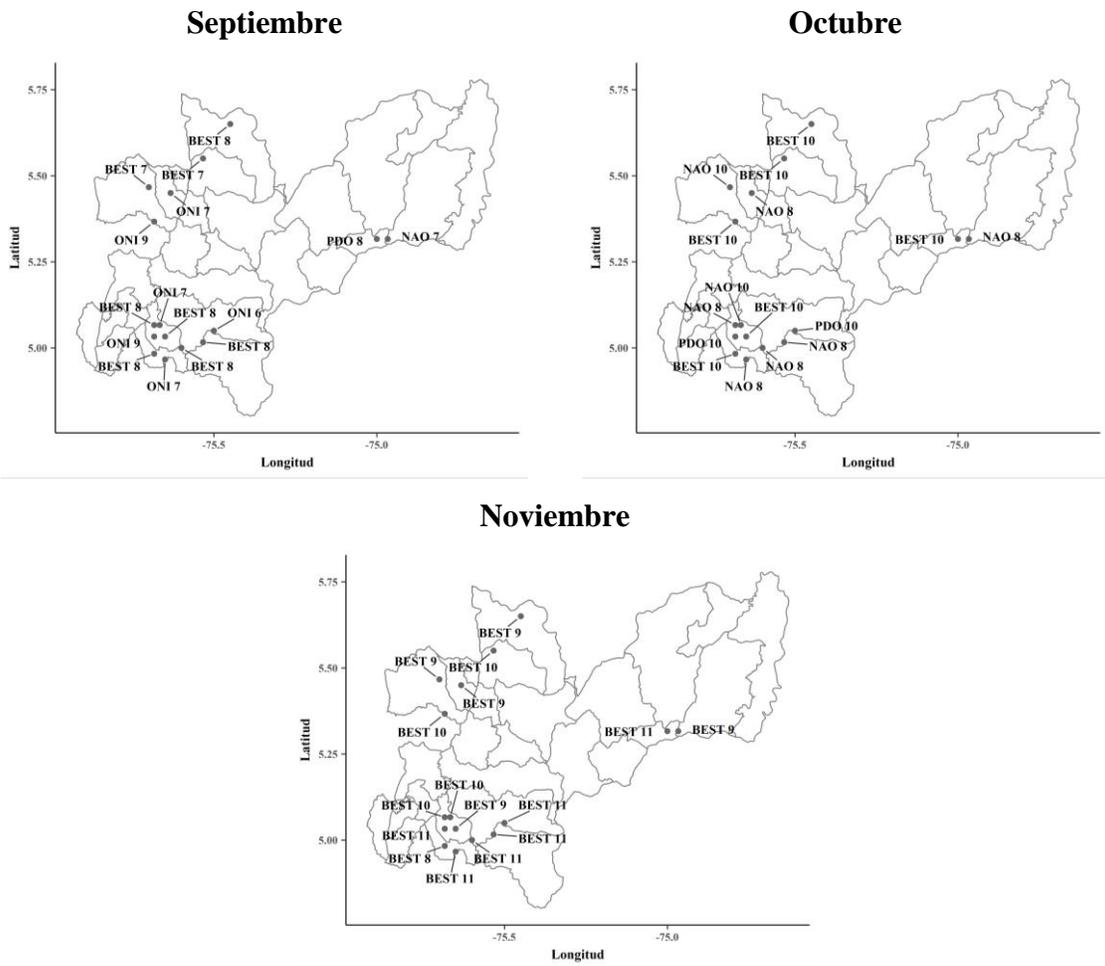


Figura 1.9. Índice-Mes que mejor correlacionó con los meses de septiembre, octubre y noviembre. El número que precede a la sigla del índice predictor, corresponde al mes con el cual se presentó la mejor correlación. Fuente: Elaboración propia.

En general, los resultados coinciden con las observaciones realizadas por Ramirez B. y Jaramillo R., (2009), quienes reportaron que los meses históricamente conocidos como los de alta precipitación, que tienen influencia de la ZCIT, son los meses que tienen menor efecto de ENOS.

Los resultados de las correlaciones con rezago entre la precipitación acumulada mensual y los índices que caracterizan las condiciones del Océano Pacífico ecuatorial, son negativas y significativas, lo que significa que cuando la temperatura superficial del mar aumenta, las precipitaciones de las estaciones analizadas tienden a disminuir; lo contrario, es decir mayores precipitaciones, sucederían cuando la temperatura superficial del mar disminuye con respecto al periodo base. Estos resultados apoyan la idea de Choubin et al., (2014), que hay una relación más significativa entre las precipitaciones cuando se considera el periodo de rezago para la predicción, en comparación con la predicción de lluvia cuando la correlación se hace simultáneamente.

Al igual que en otros trabajos (Peña-Q et al., 2016; Poveda et al., 2002a; Ramirez B. and Jaramillo R., 2009), los resultados de este estudio revelan la importante influencia de la variabilidad del océano pacífico tropical y Atlántico sobre la variabilidad de la precipitación en las distintos meses y localidades, y el significativo potencial de predicción que tiene el fenómeno ENOS sobre la precipitación en Caldas, Colombia.

Las precipitaciones en el departamento de Caldas son moderadamente predecibles basadas en el índice BEST de ENOS, durante enero, febrero, abril, mayo, junio, septiembre y noviembre. Durante enero, febrero y junio, si el valor del índice rezagado es positivo conduciría a que las condiciones fueran más secas, mientras que, en los meses de abril, mayo y noviembre, si el índice BEST es negativo, las precipitaciones serían en promedio más altas que lo normal. Éstas anomalías de las precipitaciones relacionadas con ENOS pueden estar moduladas por la ODP y ligadas con la velocidad vertical del viento asociada con la circulación de Walker (Gershunov and Barnett, 1998; Lyra et al., 2017; Moon et al., 2015), que crea un cambio significativo en las precipitaciones cuando está en la misma fase con la ODP y un cambio débil cuando está fuera de fase. Según Lyra et al., (2017), cuando el ENOS está fuera de fase con la ODP, se encuentra relacionado con cambios débiles en las condiciones de humedad o déficit. También reporta que en las últimas décadas la ODP se ha

vuelto negativa, generando más eventos de La Niña, promoviendo a que las zonas húmedas seas más húmedas.

#### **1.4 Discusión y Conclusiones**

En la presente investigación, se estudió la correlación entre los índices climáticos ONI, BEST, ODP y NAO con la lluvia de la zona cafetera de Caldas. Para este fin, se utilizaron 16 estaciones convencionales con 30 años de información. Se calcularon los coeficientes de correlación entre la precipitación mensual y los índices climáticos, con diferentes rezagos, desde 1 hasta 3 meses. Los resultados de las mejores correlaciones para cada mes, mostraron que los índices tienen una relación inversa con la precipitación, siendo significativas desde 0 hasta 3 meses de rezago, impactando tanto en las temporadas secas como en las húmedas. En general, las fases frías de los índices tienden a causar mayor ocurrencia de precipitaciones, y las fases cálidas de los índices tienden a causar mayor ocurrencia de sequías.

Aunque existe una relación entre los índices que caracterizan ENOS y las precipitaciones en el departamento de Caldas, no es significativo en todos los meses como para predecir de forma consistente y con precisión la precipitación. Sin embargo, los análisis de correlaciones con rezago dejan ver una oportunidad al utilizar variables más instantáneas que ONI, que podrían utilizarse de manera alterna para pronosticar las lluvias de los meses de enero, febrero, abril, mayo, junio, septiembre y noviembre en Caldas, ya que la agricultura, especialmente el cultivo del café, depende de las precipitaciones para la planificación de labores agrícolas.

Es necesario que la relación entre el índice y la variable tengan un rezago si se quieren predecir las lluvias, ya que la ausencia de rezago es anacrónico. El índice BEST, por ejemplo, podría usarse junto con un modelo hidrológico para predecir precipitaciones, debido a que éste es un índice cuyo valor se publica mensualmente, y la mayoría de resultados mostró mejores correlaciones hasta con 3 meses de rezago. Una alternativa para aprovechar el índice ONI, o cualquier relación simultánea entre uno de los índices con la lluvia, es el uso de las predicciones estacionales para los índices ENOS basados en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) hechas por varios centros de pronóstico como el Instituto Internacional de

Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI). Será necesario actualizar las predicciones a medida que la nueva información de ENOS esté disponible cada quince días, para conducir a mejores predicciones de precipitación en los siguientes meses. Es importante también que se desarrolle una fuerte circulación de Walker, capaz de consolidar el ciclo ENOS (Feng and Poulsen, 2014).

Este trabajo demostró que los distintos índices climáticos utilizados tienen un impacto significativo en las variaciones de precipitación a escala mensual en las 16 estaciones del departamento de Caldas. ODP y NAO tienen menores impactos sobre las variaciones de precipitación. Los resultados de este estudio proporcionan una base teórica para la previsión de mayores o menores precipitaciones utilizando índices climáticos como predictores en las distintas regiones cafeteras del departamento de Caldas. Esto puede ayudar a mejorar la mitigación de los riesgos por exceso o déficit hídrico en el suelo.

En el desarrollo de modelos para la predicción de las condiciones húmedas y secas o menos húmedas mediante la adopción de un índice de clima específico como predictor, es necesario que las correlaciones entre la lluvia y los índices climáticos estén sujetos a una estabilidad fuerte y con significancia estadística. Por otra parte, los índices climáticos tienden a tener impactos sobre las variaciones mensuales de lluvia hasta después de tres meses, lo que implica que el pronóstico de los periodos secos, húmedos o muy húmedos sea una tarea desafiante. De acuerdo a la investigación, los índices de clima adecuados como predictores para la precipitación mensual son ONI y BEST por presentar mejor significancia estadística.

## 1.5 Bibliografía

- Arnold, J.B., Daroczi, G., Werth, B., Weitzner, B., Kunst, J., Auguie, B., Rudis, B.,  
Package.), H.W. (Code From The Ggplot2, Package), J.T. (Code From The Labeling,  
London, J., 2017. Ggthemes: Extra Themes, Scales And Geoms For “Ggplot2.”
- Cabarcas, R., Carmen, A. Del, Caicedo, P., Daniel, J., 2013. Effect Of The El Niño And La  
Niña Phenomena On Precipitation And Agricultural Production In The Department  
Of Atlántico (Colombia). *Cuad. Geogr. - Rev. Colomb. Geogr.* 22, 35–54.
- Choubin, B., Khalighi-Sigaroodi, S., Malekian, A., Ahmad, S., Attarod, P., 2014. Drought  
Forecasting In A Semi-Arid Watershed Using Climate Signals: A Neuro-Fuzzy  
Modeling Approach. *J. Mt. Sci.* 11, 1593–1605. Doi:10.1007/S11629-014-3020-6
- Córdoba, S., Palomino, R., Castro, Y., Gámiz, S., Esteban, M.J., 2012. Mecanismos Causales  
De La Variabilidad De La Precipitación En Colombia. Mechanisms Of Precipitation  
Variability At Colombia. Presented At The Congreso Internacional Cambio  
Climático. Extremos E Impactos. AEC., Salamanca, España, Pp. 301–310.
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Esteban-Parra, M.J., 2014. Influencia De La  
SST Y La SLP Sobre La Variabilidad De La Temperatura En Colombia. *Rev.  
Biodivers. Neotropical* 4, 124–132. Doi:10.18636/Bioneotropical.V4i2.198
- Díaz, D., Villegas, N., 2015. CANONICAL CORRELATION BETWEEN LARGE SCALE  
CLIMATE OSCILLATIONS AND SURFACE METEOROLOGICAL  
VARIABLES IN COLOMBIA. *Rev. UDCA Actual. Amp Divulg. Científica* 18,  
543–552.
- Diaz, H.F., Markgraf, V., 1992. El Niño: Historical And Paleoclimatic Aspects Of The  
Southern Oscillation. Cambridge University Press.
- Feng, R., Poulsen, C.J., 2014. Andean Elevation Control On Tropical Pacific Climate And  
ENSO. *Paleoceanography* 29, 2014PA002640. Doi:10.1002/2014PA002640
- FNC, N.D. Estadísticas Historicas [WWW Document]. Fed. Nac. Cafe. URL  
[https://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/quienes\\_somos/119\\_estadisticas\\_historicas/](https://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/) (Accessed 8.24.17).
- Gershunov, A., Barnett, T.P., 1998. Interdecadal Modulation Of ENSO Teleconnections.  
*Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79, 2715–2725. Doi:10.1175/1520-  
0477(1998)079<2715:IMOET>2.0.CO;2
- Gíl, M.M., Quiceno, N., Poveda, G., 1998. Efecto Del ENSO Y La NAO Sobre El Ciclo  
Anual De La Hidrología De Colombia: Análisis De Correlación, Reánalisis De  
NCEP/NCAR Y Modelos De Pronóstico. *Av. En Recur. Hidráulicos* 41–53.
- Glantz, M.H., Katz, R.W., Nicholls, N., 1991. Teleconnections Linking Worldwide Climate  
Anomalies, Cambridge University Press. Ed. Cambridge University Press.

- Guzman M, O., Baldion R, J.V., 1997. Regionalización Climática De Una Zona Montañosa Tropical Empleando El Análisis Multivariado. *Cenicafé* 48, 260–274.
- Hastenrath, S., 2002. The Intertropical Convergence Zone Of The Eastern Pacific Revisited. *Int. J. Climatol.* 22, 347–356. Doi:10.1002/Joc.739
- Hastenrath, S., 1990. Tropical Climate Prediction: A Progress Report, 1985–90. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 71, 819–825. Doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0819:TCPAPR>2.0.CO;2
- Hu, Z.-Z., Wu, R., Kinter, J.L., Yang, S., 2005. Connection Of Summer Rainfall Variations In South And East Asia: Role Of El Niño–Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.* 25, 1279–1289. Doi:10.1002/Joc.1159
- Huang, B., Banzon, V.F., Freeman, E., Lawrimore, J., Liu, W., Peterson, T.C., Smith, T.M., Thorne, P.W., Woodruff, S.D., Zhang, H.-M., 2014. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.V4). Part I: Upgrades And Intercomparisons. *J. Clim.* 28, 911–930. Doi:10.1175/JCLI-D-14-00006.1
- Jaramillo R., A., Arcila P., J., 2009a. Variabilidad Climática En La Zona Cafetera Colombiana Asociada Al Evento De La Niña Y Su Efecto En La Caficultura. *Av. Téc. Cenicafé.*
- Jaramillo R., A., Arcila P., J., 2009b. Variabilidad Climática En La Zona Cafetera Colombiana Asociada Al Evento De El Niño Y Su Efecto En La Caficultura. *Av. Téc. Cenicafé.*
- Jaramillo R., A., Chaves C., B., 2000. Distribución De La Precipitación En Colombia Analizada Mediante Conglomeración Estadística. *Cenicafé* 51, 102–113.
- Jaramillo R., A., Ramirez B., V.H., Arcila P., J., 2011. Patrones De Distribución De La Lluvia En La Zona Cafetera.
- Kumar, K.K., Rajagopalan, B., Cane, M.A., 1999. On The Weakening Relationship Between The Indian Monsoon And ENSO. *Science* 284, 2156–2159. Doi:10.1126/Science.284.5423.2156
- Lau, N.-C., Nath, M.J., 1994. A Modeling Study Of The Relative Roles Of Tropical And Extratropical SST Anomalies In The Variability Of The Global Atmosphere-Ocean System. *J. Clim.* 7, 1184–1207. Doi:10.1175/1520-0442(1994)007<1184:AMSOTR>2.0.CO;2
- Leon A., G.E., Zea M., J.A., Eslava R., J.A., 2000. Circulación General Del Tropico Y La Zona De Confluencia Intertropical En Colombia. *Meteorol. Colomb.* 1, 31–38.
- Lyra, G.B., Oliveira-Júnior, J.F., Gois, G., Cunha-Zeri, G., Zeri, M., 2017. Rainfall Variability Over Alagoas Under The Influences Of SST Anomalies. *Meteorol. Atmospheric Phys.* 129, 157–171. Doi:10.1007/S00703-016-0461-1

- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C., 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation With Impacts On Salmon Production. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 1069–1079. Doi:10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2
- Markowski, P., Richardson, Y., 2010. *Mesoscale Meteorology In Midlatitudes*. Wiley.
- Mesa, O., Poveda, G., Carvajal Serna, L., 1997. *Introducción Al Clima De Colombia*. Universidad Nacional De Colombia.
- Minobe, S., 1997. A 50–70 Year Climatic Oscillation Over The North Pacific And North America. *Geophys. Res. Lett.* 24, 683–686. Doi:10.1029/97GL00504
- Montealegre B, J.E., Pabón C., J.D., 2000. La Variabilidad Climática Interanual Asociada Al Ciclo El Niño-La Niña– Oscilacion Del Sur Y Su Efecto En El Patrón Pluviométrico De Colombia. *Meteorol. Colomb.* 2, 7–21.
- Moon, J.-H., Song, Y.T., Lee, H., 2015. PDO And ENSO Modulations Intensified Decadal Sea Level Variability In The Tropical Pacific. *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 8229–8237. Doi:10.1002/2015JC011139
- Paegle, J.N., Mo, K.C., 2002. Linkages Between Summer Rainfall Variability Over South America And Sea Surface Temperature Anomalies. *J. Clim.* 15, 1389–1407. Doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1389:LBSRVO>2.0.CO;2
- Peña Q., A.J., Ramirez B., V.H., Valencia A., J.A., Jaramillo R., A., 2013. La Lluvia Como Factor De Amenaza Para El Cultivo Del Café En Colombia. *Av. Téc. Cenicafé*.
- Peña-Q, A.J., Ramírez-C, C., Bermúdez-F, L.N., Riaño-H, N.M., 2016. Rainfall Patterns Associated With The Oceanic Niño Index In The Colombian Coffee Zone. *J. Agric. Sci.* 8, 56. Doi:10.5539/Jas.V8n3p56
- Philander, S.G., 1989. *El Nino, La Nina, And The Southern Oscillation*. Academic Press.
- Portig, W.H., 1965. Central American Rainfall. *Geogr. Rev.* 55, 68–90. Doi:10.2307/212856
- Poveda, G., 2004. La Hidroclimatología De Colombia: Una Síntesis Desde La Escala Inter-Decadal Hasta La Escala Diurna. *Rev Acad Colomb Cienc* 28, 201–222.
- Poveda, G., Mesa, Ó.J., 1996. Las Fases Extremas Del Fenómeno ENSO (El Niño Y La Niña) Y Su Influencia Sobre La Hidrología De Colombia. *Tecnol. Cienc. Agua* 11, 21–37.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, F., Barco, O., Correa, P., 2002a. Influencia De Fenómenos Macroclimáticos Sobre El Ciclo Anual De La Hidrología Colombiana: Cuantificación Lineal, No Lineal Y Percentiles Probabilísticos. *Meteorol. Colomb.* 6, 121–130.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, F., Barco, O., Correa, P., 2002b. Influencia De Fenómenos Macroclimáticos Sobre El Ciclo Anual De La Hidrología

- Colombiana: Cuantificación Lineal, No Lineal Y Percentiles Probabilísticos. *Meteorol. Colomb.* 6, 121–130.
- Poveda, G., Waylen, P.R., Pulwarty, R.S., 2006. Annual And Inter-Annual Variability Of The Present Climate In Northern South America And Southern Mesoamerica. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 234, 3–27. Doi:10.1016/J.Palaeo.2005.10.031
- Puertas Orozco, O.L., Carvajal Escobar, Y., 2011. Incidencia De El Niño-Oscilación Del Sur En La Precipitación Y La Temperatura Del Aire En Colombia, Utilizando El Climate Explorer. *Rev. Científica Ing. Desarro.* 23, 104–118.
- Ramirez B., V.H., Arcila P., J., Jaramillo R., A., Rendon S., J.R., Cuesta G., G., Menza F., H.D., Mejia M., C.G., Montoya, D.F., Mejia M., J.W., Torres N., J.C., Sanchez A., P.M., Baute B., J.E., Peña Q., A.J., 2014. Floración Del Café En Colombia Y Su Relación Con La Disponibilidad Hídrica Térmica Y De Brillo Solar. *Rev. Cenicafé* 2, 132–158.
- Ramirez B., V.H., Jaramillo R., A., 2009. Relación Entre El Índice Oceánico De El Niño Y La Lluvia En La Región Andina Central De Colombia.
- Ramirez B., V.H., Jaramillo R., A., Arcila P., J., 2013. Rangos Adecuados De Lluvia Para El Cultivo De Café En Colombia. *Avance Técnico* 395. *Av. Téc. Cenicafé.*
- Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., Wang, W., 2002. An Improved In Situ And Satellite SST Analysis For Climate. *J. Clim.* 15, 1609–1625. Doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2
- Riehl, H., 1979. *Climate And Weather In The Tropics.* Academic Press.
- Rojo H., J.D., 2011. *Desarrollo De Un Sistema Experto Para La Predicción De Caudales Medios Mensuales En Colombia (Magister).* Universidad Nacional De Colombia, Sede Medellín.
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S., 1987. Global And Regional Scale Precipitation Patterns Associated With The El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.* 115, 1606–1626. Doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2
- Shukla, J., Mooley, D.A., 1987. Empirical Prediction Of The Summer Monsoon Rainfall Over India. *Mon. Weather Rev.* 115, 695–704. Doi:10.1175/1520-0493(1987)115<0695:EPOTSM>2.0.CO;2
- Smith, C.A., Sardeshmukh, P.D., 2000. The Effect Of ENSO On The Intraseasonal Variance Of Surface Temperatures In Winter. *Int. J. Climatol.* 20, 1543–1557. Doi:10.1002/1097-0088(20001115)20:13<1543::AID-JOC579>3.0.CO;2-A
- Team R.C., 2000. *R Language Definition.* R: The R Project For Statistical Computing. Vienna, Austria.

- Team Rstudio, 2015. Rstudio: Integrated Development For R.
- Tootle, G.A., Piechota, T.C., Gutiérrez, F., 2008. The Relationships Between Pacific And Atlantic Ocean Sea Surface Temperatures And Colombian Streamflow Variability. *J. Hydrol.* 349, 268–276. Doi:10.1016/J.Jhydrol.2007.10.058
- Trenberth, K.E., 1997a. The Definition Of El Niño. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 2771–2777. Doi:10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2
- Trenberth, K.E., 1997b. The Definition Of El Niño. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 2771–2777. Doi:10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2
- Trenberth, K.E., Stepaniak, D.P., 2001. Indices Of El Niño Evolution. *J. Clim.* 14, 1697–1701. Doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2
- Trojer, H., 1959. Fundamentos Para Una Zonificación Meteorológica Y Climatológica Del Trópico Y Especialmente De Colombiascielo Colombia. *Cenicafé* 10, 289–373.
- Verdon, D.C., Franks, S.W., 2006. Long-Term Behaviour Of ENSO: Interactions With The PDO Over The Past 400 Years Inferred From Paleoclimate Records. *Geophys. Res. Lett.* 33, L06712. Doi:10.1029/2005GL025052
- Walker, S.G.T., 1924. Correlation In Seasonal Variations Of Weather, IX: Further Study Of World-Weather. Meteorological Office.
- Waylen, P.R., Quesada, M.E., Caviedes, C.N., 1996. Temporal And Spatial Variability Of Annual Precipitation In Costa Rica And The Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.* 16, 173–193.
- Webster, P.J., Lukas, R., 1992. TOGA COARE: The Coupled Ocean—Atmosphere Response Experiment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 73, 1377–1416. Doi:10.1175/1520-0477(1992)073<1377:TCTCOR>2.0.CO;2
- Wickham, H., 2016a. *Plyr: Tools For Splitting, Applying And Combining Data.*
- Wickham, H., 2016b. *Ggplot2: Elegant Graphics For Data Analysis.* Springer.
- Wilkinson, L., Friendly, M., 2009. The History Of The Cluster Heat Map. *Am. Stat.* 63, 179–184. Doi:10.1198/Tas.2009.0033
- Wu, R., Hu, Z.-Z., Kirtman, B.P., 2003. Evolution Of ENSO-Related Rainfall Anomalies In East Asia. *J. Clim.* 16, 3742–3758. Doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3742:EOERAI>2.0.CO;2
- Yarnal, B., 1985. El Niño/Southern Oscillation Research. *Prof. Geogr.* 37, 191–193. Doi:10.1111/J.0033-0124.1985.00191.X
- Zhang, Y., Wallace, J.M., Battisti, D.S., 1997. ENSO-Like Interdecadal Variability: 1900–93. *J. Clim.* 10, 1004–1020. Doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2

## **2. Uso de dos modelos estocásticos para la generación de periodos decadiarios secos, húmedos y muy húmedos en tres estaciones de la zona cafetera de Caldas, Colombia.**

### **Use of two stochastic models for the generation of dry, humid and very humid decadiarios periods in three stations of the coffee zone of Caldas, Colombia.**

*Carolina Ramírez C., Jorge J. Vélez U., Andrés J. Peña Q.*

#### **Resumen.**

Una necesidad recurrente de los caficultores colombianos consiste en la previsión decadiaria de la lluvia para proyectar las actividades agrícolas en la finca. Este trabajo propone dos metodologías para dar una predicción decadiaria de los periodos secos, húmedos y muy húmedos en la zona cafetera del departamento de Caldas, ambas basadas en métodos estocásticos. La primera de ellas utiliza un modelo de cadena de Markov de segundo orden para simular la aparición de precipitación, y una distribución teórica de probabilidad para simular cantidades diarias de precipitación (Suemulador). La segunda emplea una cadena de Markov de primer orden para simular la aparición de décadas húmedas, muy húmedas y secas, teniendo en cuenta matrices de transición trimestrales (modelo de desarrollo propio). Se realiza un análisis espacio temporal de la lluvia para encontrar regiones con patrones de lluvia similar que permitan el uso de los métodos por región. El rendimiento del modelo propio es consistentemente mejor que el Suemulador, especialmente cuando se revisa el resultado por década y en la reproducción de estados secos, húmedos y muy húmedos en las estaciones con precipitaciones anuales por encima de 1100 mm. Los resultados indican que el rendimiento del modelo propio es dependiente del lugar, y que debe realizarse la validación, sobre todo para estudios en nuevas regiones.

**Palabras Clave:** Seco, Húmedo, Markov, Suemulador, región Andina, Colombia.

#### **Abstract.**

A recurrent need of Colombian coffee farmers consists of the rain forecast of the rainy days to project agricultural activities on the farm. This work proposes two methodologies to give a decadal prediction of the dry, humid and very humid periods in the coffee zone of the

department of Caldas, both based on stochastic methods. The first uses a second-order Markov chain model to simulate the occurrence of precipitation, and a theoretical probability distribution to simulate daily precipitation amounts (Suemulador). The second uses a Markov chain of the first order to simulate the appearance of wet, very wet and dry decades, taking into account quarterly transition matrices (own development model). A temporal space analysis of the rain is performed to find regions with similar rainfall patterns that allow the use of the methods by region. The performance of the own model is consistently better than the Suemulador, especially when reviewing the result per decade and in the reproduction of dry, wet and very wet states in seasons with annual rainfall above 1100 mm. The results indicate that the performance of the own model is dependent on the place, and that the validation must be carried out, especially for studies in new regions.

**Keywords:** Dry, Wet, Markov, Suemulador, Andean region, Colombia.

## 2.1 Introducción

Debido a que el clima es uno de los factores que influye en la programación de las actividades de la finca, conocer a corto y mediano plazo el estado futuro de las variables meteorológicas para planificar qué y cuándo hacer, ha sido un tema de gran interés para los productores agrícolas. Por su importancia como factores de producción, la radiación solar, la temperatura del aire y la lluvia (Jaramillo R., A. et al., 2011) son los elementos del clima que todo agricultor quisiera conocer de antemano para tomar sus decisiones. Sin embargo, en el contexto de la producción agrícola colombiana, es decir, en condiciones ecuatoriales y con predominancia de sistemas de producción bajo secano, la cantidad y distribución de la lluvia a través del año es el principal regulador de la acumulación de materia seca vegetal. En el caso específico de la producción de café, la relación entre la lluvia acumulada y la evapotranspiración a escala mensual están altamente relacionadas con los cambios fenológicos expresados por la planta de café y la producción anual del cultivo (Jaramillo R., A. et al., 2011b; Jaramillo R., A. and Arcila P., J., 1996).

La distribución intra-anual típica de las lluvias en la zona cafetera central de Colombia, y específicamente en el departamento de Caldas, muestra dos periodos húmedos y dos periodos menos húmedos, principalmente como resultado del doble paso de la Zona de Confluencia

Intertropical (ZCIT), la cual condiciona el tiempo de alta nubosidad y gran cantidad de lluvia (Hastenrath, 1990, 1991, 2002, p. 200; Portig, 1965; Poveda et al., 2006, p. 200; Waylen et al., 1996). Además de este patrón cíclico, muchas investigaciones (Cabarcas et al., 2013; Gíl et al., 1998b; Jaramillo R. and Arcila P., 2009; Méndez González et al., 2011; Montealegre B and Pabón C., 2000; Peña Q. et al., 2001; Peña-Q et al., 2015, 2016b; Poveda, G. et al., 1998; Poveda et al., 2002b; Poveda and Mesa, 1996) han expuesto que eventos de índole oceánica, capaces de generar variaciones en el patrón de circulación general atmosférica, tienen influencia sobre el comportamiento de la pluviosidad en la región cafetera de Caldas. La sinergia existente entre la variabilidad climática y los cultivos perennes determinan que los cambios en el patrón típico de comportamiento de las lluvias, que es lo que generalmente sucede durante la presencia de eventos como El Niño y La Niña, afecten de forma positiva o negativa la producción anual del café.

La información oportuna de periodos secos, húmedos o muy húmedos en el corto y mediano plazo, por ejemplo, en los próximos diez días, se convierte en un apoyo para la toma de decisiones que en consecuencia mejorará la planificación de las labores de cultivo y el rendimiento a largo plazo de la empresa agrícola. Existen modelos que generan la probabilidad de ocurrencia de períodos secos y húmedos por medio de cadenas de Markov (Gabriel and Neumann, 1962; Taewichit et al., 2013), partiendo del supuesto de que en los próximos días se presente un periodo húmedo, relacionado con el o los periodos secos o húmedos de días anteriores. Estos modelos son más conocidos como “generadores de tiempo”, los cuales proporcionan funciones de apoyo útiles en los sistemas hidrológicos e hidráulicos (Marshall et al., 2004), simulaciones agrícolas o del ecosistema, tal como el rendimiento de los cultivos (Camberlin et al., 2001), para la generación de series sintéticas de lluvia que son estadísticamente relacionadas con los registros históricos (Bardossy and Plate, 1992; Mehrotra and Sharma, 2007a, 2007b; Pineda and Willems, 2015; Wilks, 1998), ayudando a cuantificar la incertidumbre que resulta de la variabilidad climática (Burton et al., 2008; Harrold et al., 2003), y pronosticando la variabilidad espacial y temporal de la precipitación (incluyendo los efectos del cambio climático) (Frost et al., 2011).

Algunos autores han aumentado la certidumbre, condicionando al modelo de precipitación una covariable, para explicar gran parte de la variabilidad interanual observada en las series

de precipitación. Por ejemplo Wilks (1989), lo hizo utilizando predicciones probabilísticas de 30 días emitidas por “The United States Climate Analysis Centre, Centro de Análisis de Clima de los Estados Unidos”; mientras que otros investigadores han utilizado covariables que contienen señales atmosféricas (Hughes et al., 1999; Hughes and Guttorp, 1994; Mehrotra and Sharma, 2005; Wilks, 1989) como el Índice de Oscilación del Sur. Incluso se han desarrollado herramientas para la generación de eventos de lluvia basados en el modelo de cadena de Markov ortogonal (Baigorria and Jones, 2010), de primer orden (Fu et al., 2015; Smith Quintero et al., 2004), de segundo orden (Chica et al., 2014) y de tercer orden (Jones and Thornton, 2000).

Generalmente se ha encontrado que los modelos de primer orden son óptimos para algunas regiones, indicando que las características de predictibilidad se basan en las condiciones del período anterior, siendo apropiados para describir la distribución de los períodos secos y húmedos (Chowdhury and Beecham, 2013; Halder et al., 2016; Pandey et al., 2011; Rad et al., 2016; Yeh et al., 2015). Sin embargo, otros trabajos han seleccionado un modelo con orden superior por presentar resultados útiles como estrategia de apoyo a la planificación de los recursos hídricos (Ababaei et al., 2014; Jahangir Alam et al., 2014).

El objetivo de este estudio es validar dos modelos como predictores de periodos decadiarios secos, húmedos o muy húmedos. El primero fue desarrollado para la simulación de datos faltantes, pero en este caso se utilizará para pronosticar cantidad de lluvia, transformando la cantidad en condiciones secas, húmedas o muy húmedas, y el segundo se desarrolló para la predicción de condiciones secas, húmedas o muy húmedas. Ambos están estructurados alrededor de la base teórica del comportamiento estocástico de las variables climáticas.

## **2.2 Área de estudio y datos**

El área de estudio es el departamento de Caldas, Colombia, que se extiende entre los 75.92 y los 74.62° de longitud Oeste y los 4.79 y 5.77° de latitud Norte. Este departamento es uno de los más productores de café en Colombia, ya que su producción de café pergamino verde representa cerca del 10 por ciento de la producción nacional (FNC, 2017). Se utilizaron los datos de precipitación de 23 estaciones (*Figura 2.1*), suministrados por el Centro Nacional de Investigaciones del Café en Colombia – Cenicafé. Las estaciones meteorológicas se

ubican en una zona orográfica que van desde altitudes de 1026 hasta 2088 msnm, cubriendo el espectro de elevaciones para el cultivo del café.

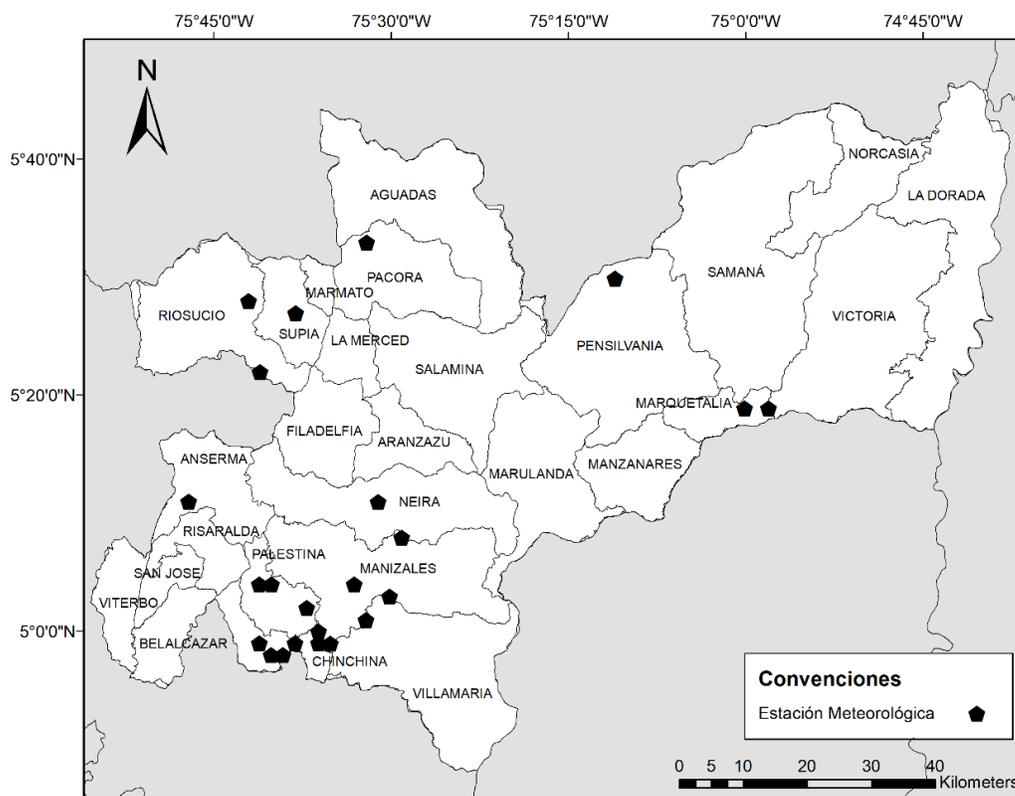


Figura 2.1. Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.1 Variación espacio temporal de la lluvia

Para el propósito de interpolar la lluvia espacialmente se utilizó el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés), el cual se basa en la primera ley de Tobler (1970) que expresa que todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las distantes. El IDW es un método determinista de interpolación de datos espaciales que fue desarrollado por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos en 1972. De acuerdo con lo expresado por Tobler (1970), el método se basa en la suposición de que el valor del atributo de un punto no muestreado es la media ponderada de los valores conocidos dentro de los vecinos (Chen y Liu, 2012; Shepard, 1968). Esto

implica que el proceso asigne valores a los puntos desconocidos mediante el uso de valores de un conjunto disperso de puntos conocidos. El valor en el punto desconocido es la suma ponderada de los valores de los puntos de N conocidos. En este estudio se utilizó IDW para interpolar los datos de lluvia decadiarios espaciales, que se basa en un concepto de ponderación de la distancia.

Alrededor del 1% hasta el 12% de los datos faltaban en 12 de las 23 series de precipitación empleadas en el estudio.

*Tabla 2.1. Estaciones utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.*

Número	Código	Estación	Información		Porcentaje Datos Faltantes
			Año inicio	Año fin	
1	6	La Juliana	1994	2016	0
2	37	Planalto	1992	2016	0
3	2001	Piamonte	1999	2016	0
4	2006	Santa Fe	1999	2016	0
5	2018	El Pistacho	1992	2016	3
6	2302002	La Pastorita	1980	2016	12
7	2302503	Santa Helena	1980	2016	1
8	2305036	Hogar Juvenil	1989	2016	3
9	2613037	La Francia	1993	2016	3
10	2613047	La Sierra	1987	2016	1
11	2613053	La Romelia	1989	2016	0
12	2613505	Naranjal	1955	2016	0
13	2615010	La Margarita	1999	2016	1
14	2615035	Java	1980	2016	3
15	2615038	La Divisa	1992	2016	0
16	2615502	Cenicafé	1941	2016	0
17	2615505	Agronomía	1969	2016	1
18	2615509	Santágueda	1963	2016	0
19	2615514	Granja Luker	1964	2016	0
20	2616027	La Linda	1983	2016	9
21	2617013	La Manuelita	1970	2016	2
22	2617032	La Argentina Rafael	1977	2016	1
23	2617507	Escobar	1970	2016	0

### 2.2.2 Prueba de homogenización normal estándar

Se utilizó la prueba de homogeneidad normal estándar (SNHT) modificada por Browning y Hering (2015), para identificar los valores atípicos o puntos de cambio en la media de la serie, y para comprobar la homogenización en los datos de precipitación, bajo la hipótesis nula de que los valores decadiarios de las variables de prueba son independientes e idénticamente distribuidos y las series son consideradas homogéneas. Mientras que la hipótesis alternativa supone que la serie presenta una ruptura en la media y se considera como una serie no homogénea. Ésta prueba es capaz de detectar el año, el mes y la década en la que se produce el cambio en la media.

Para las series de lluvia se consideró la suma de las décadas del año (Período de diez días). Para cada observación o década se calcularon dos medias: una para los décadas previas a la observación  $i$ ,  $\bar{X}_{L,i}$  y otra para las  $N$  décadas siguientes,  $\bar{X}_{R,i}$ . El estadístico de prueba calculado

$$T_i = \frac{N(\bar{X}_{L,i} - \bar{X}_{R,i})^2}{2s_i^2}$$

*Ecuación 1*

donde  $s_i$  es la desviación estándar estimada durante los  $N$  décadas previas y siguientes a la observación  $i$ . Si no hay  $N$  observaciones tanto antes como después de la observación, la prueba no se realiza. Si las observaciones ( $X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_{2N}$ ) son independientes y normalmente distribuidas, y si  $s_i^2$  se sustituye por la varianza verdadera  $\sigma^2$ , entonces claramente  $T_i$  sigue una distribución de chi cuadrado con 1 grado de libertad.

Los valores críticos de la prueba SNHT para el nivel de significancia de 10%, 5% y 2.5% (**Tabla 2.2**) son dados por Alexandersson y Moberg (1997).

**Tabla 2.2.** Niveles críticos para la prueba con dos desviaciones estándar independientes.

*Fuente: Elaboración propia.*

n	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T <sub>90</sub>	13.35	13.70	13.95	14.15	14.25	14.30	14.35	14.35	14.40	14.40
T <sub>95</sub>	16.00	16.30	16.45	16.55	16.65	16.70	16.75	16.80	16.85	16.85
T <sub>97.5</sub>	18.60	18.85	19.05	19.20	19.30	19.35	19.40	19.45	19.50	19.50

### 2.2.3 Llenado de datos faltantes

La ausencia de datos faltantes dificulta el análisis de las series de tiempo, por lo tanto, fue necesario emplear una metodología para el llenado de datos faltantes, de tal forma que se reflejara lo que pudo haberse registrado en esos períodos de tiempo.

Para generar los datos faltantes se utilizó el método de la razón, que permite calcular los valores faltantes con el uso de una fórmula matemática en función de datos promedios de una estación de referencia, tomando como base las estaciones con patrones similares de precipitación decadiaria, siempre y cuando la media de la estación escogida no difiriera en más del 10% de la media de la estación con datos faltantes (Guevara D., 2003).

$$P_x = \frac{1}{n} \left[ \left( \frac{N_x}{N_1} \right) P_1 \right]$$

*Ecuación 2*

En donde n es el número de estaciones pluviométricas con datos de registros continuos. Para todos los casos fue 1. P<sub>x</sub> es la precipitación de la estación con datos faltantes (x) durante el período de tiempo a completar. P<sub>1</sub> es la precipitación de la estación de referencia durante el período de tiempo a completar. N<sub>x</sub> es la precipitación media decadiaria de la estación (x) y N<sub>1</sub> es la precipitación media decadiaria de la estación de referencia.

Con la ayuda de un análisis de conglomerados a través del método de agrupamiento jerárquico de Ward (Ward, 1963), que considera las distancias euclidianas al cuadrado como medida de disimilitud (Everitt et al., 1991), se determinó el número de grupos de estaciones hallando el nivel en el que se maximiza la similitud dentro de los grupos, mientras que la similitud entre grupos se reduce al mínimo. Con el resultado obtenido a partir de la agrupación de estaciones, se escogió una estación de referencia que estuviera dentro del mismo grupo por cada estación que tuviera datos faltantes. El criterio para escoger la estación de referencia fue que tuviera la menor variación con los datos de la estación a la cual se le haría el llenado de datos faltantes.

#### **2.2.4 Período seco, húmedo y muy húmedo.**

Los períodos secos y húmedos están en función de la evapotranspiración y la lluvia. La lluvia es registrada por las estaciones meteorológicas de la red cafetera, pero la evapotranspiración es una variable que se estima de manera empírica. En la actualidad existen una gran cantidad de métodos indirectos que permiten estimar la evapotranspiración de referencia a partir de variables meteorológicas (Lopez Elias et al., 1991). Dichos métodos involucran el empleo de ecuaciones empíricas, las cuales requieren de información climatológica fácil de conseguir y, por lo tanto, tienen gran utilidad en la planeación agrícola.

En los últimos años, Cenicafé ha investigado y ha propuesto distintas fórmulas para estimar la evapotranspiración de referencia. En este estudio se utilizará la fórmula de Jaramillo R. (2007) (Ecuación 1), la cual se ha utilizado para conocer la ocurrencia de los períodos secos y húmedos a nivel mensual, los cuales, por años, han determinado las épocas de crecimiento, floración y desarrollo del fruto.

$$ET_0 = 4,21 * e^{0,0002A}$$

*Ecuación 3*

En donde  $E_{To}$  es la evapotranspiración de referencia y  $A$  es la altitud en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Una vez calculada la evapotranspiración de referencia, se procedió a definir los períodos secos, húmedos y muy húmedos por medio del criterio planteado por Jaramillo R., A. et al., (2011), el cual define como período seco, aquel en el que el acumulado de lluvia sea inferior a la evapotranspiración de referencia; periodo húmedo, aquel en el que el acumulado de lluvia sea mayor o igual que la evapotranspiración de referencia y menor que dos veces la evapotranspiración de referencia; y el periodo muy húmedo, aquel en el que el acumulado de lluvia sea mayor o igual a dos veces la evapotranspiración de referencia.

- Década Seca, Precipitación  $< E_{To}$ .
- Década húmeda,  $E_{To} \leq P < 2E_{To}$ .
- Década muy húmeda, Precipitación  $\geq 2E_{To}$ .

### **2.3 Metodología**

Se compararon los resultados de dos modelos estocásticos con respecto a la ocurrencia de periodos secos, húmedos y muy húmedos en tres estaciones dentro del departamento. Las estaciones se escogieron de acuerdo a los resultados obtenidos por medio del método de agrupamiento jerárquico de Ward.

En la Tabla 2.3 se presentan los principales algoritmos de los modelos utilizados para generar los periodos secos, húmedos y muy húmedos.

**Tabla 2.3.** Comparación de dos modelos estocásticos en la simulación de ocurrencia de precipitación y periodos secos y húmedos. Fuente: Elaboración propia.

Modelo	Escala de tiempo	Ocurrencia de precipitación	Cantidad de precipitación	Referencia
SUEMULADOR	Diaria	Cadena de Markov de orden dos y dos estados.	Distribución teórica de probabilidad a la que se ajustan los datos históricos.	(Chica Ramírez et al., 2014)
DESARROLLO PROPIO	Decadario	Cadena de Markov de primer orden y tres estados.		

Suemulador (Chica Ramírez et al., 2014) es una herramienta para la simulación de datos faltantes en series climáticas diarias de zonas ecuatoriales. La ventaja de Suemulador es que considera la variabilidad climática intra-anual asociada al movimiento de la Zona de Confluencia Intertrópica (ZCIT), e interanual relacionada con los cambios en los patrones del clima como consecuencia de la variación de la temperatura superficial del Océano Pacífico Tropical Central (El Niño y La Niña) para generar datos faltantes. Sin embargo, en este estudio la herramienta se utilizó para simular la precipitación diaria de los siguientes 10 días, teniendo como base real la serie histórica de la estación meteorológica y la temperatura superficial del mar de los datos a simular. Una vez que los datos fueron simulados a nivel

diario para todo el año 2016, se transformaron a un periodo decadiario, en el cual se definió si era seco, húmedo o muy húmedo, y se comparó con respecto a lo observado (Figura 2.2).

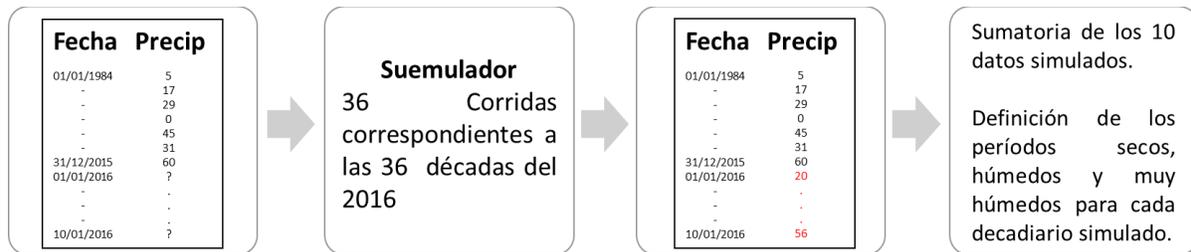


Figura 2.2. Diagrama de flujo de la metodología utilizando el software Suemulador.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de cadena de Markov de tres estados que se generó por DESARROLLO PROPIO, modela la ocurrencia de periodos secos, húmedos o muy húmedos, según el cual la probabilidad de ocurrencia de los periodos sólo depende de si la década anterior fue seca o húmeda o muy húmeda.

Por consiguiente, el procedimiento de generación de periodos secos, húmedos o muy húmedos, implica las siguientes probabilidades, en donde:

$$\text{Probabilidad} = \frac{\text{Casos favorables}}{\text{Casos totales}}$$

P(S) es la probabilidad de decadiarios secos en un periodo dado.

P(H) es la probabilidad de decadiarios húmedos en un periodo dado.

P(MH) es la probabilidad de decadiarios muy húmedos en un periodo dado.

P(S/H) es la probabilidad de un decadiario seco dado que la anterior década fue húmeda.

Otras alternativas son:

P(S/S), P(S/MH), P(H/S), P(H/H), P(H/MH), P(MH/S), P(MH/H), P(MH/MH).

Las probabilidades de la forma  $P(S)$ ,  $P(H)$  y  $P(MH)$  se denominan probabilidades iniciales, las cuales se estimaron para las distintas fases del ENSO, para cada estación y período de 10 días en el año.

Las de la forma  $P(S/H)$  son probabilidades condicionales y se calcularon por separado para cada estación y para cada período de 10 días, utilizando una formulación de ventana móvil de tres meses, desde Diciembre – Enero– Febrero (DEF) hasta Octubre Noviembre – Diciembre (OND).

La bondad de ajuste teórica para las distribuciones observadas se estimó utilizando los estadísticos de prueba Chi – cuadrado de Pearson (Plackett, 1983) y Fisher (Fisher, 1922).

## **2.4 Resultados**

### **2.4.1 Variación espacio temporal de la lluvia**

Los mapas de la Figura 2.3 muestran el comportamiento espacial de la precipitación a nivel decadiario para todos los meses. A partir de las figuras se evidencia que cada mes y década tiene un patrón espacial diferente, y que las lluvias en el oriente de Caldas son mayores que en el occidente. En las figuras los colores rojos indican lluvias menores a 30 mm, lo que en general revela que en esas zonas hay un déficit de acuerdo al balance hídrico atmosférico. Los colores naranjas, amarillos, verdes y azules denotan precipitaciones entre 30 y 260 mm, superiores a la evapotranspiración media decadal de la región.

En general, se observa que las figuras de las tres décadas de abril y mayo, octubre y noviembre muestran la precipitación más alta en comparación con el resto de meses. Esto refleja el régimen bien definido de lluvias: épocas húmedas (Abril – Mayo, Octubre – Noviembre) y épocas menos húmedas (Enero – Febrero, Julio – Agosto) y los meses de transición de ambas épocas (Diciembre, Marzo, Junio y Septiembre). Ésta dinámica está asociada a la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), que actúa todo el año. Es posible observar que la zona del oriente de Caldas es la que presenta las máximas cantidades de precipitación, especialmente en octubre y noviembre. Por el contrario, los valores más bajos de precipitación se observan desde la segunda década de junio hasta la segunda década de agosto. La precipitación decadal promedio en las épocas húmedas varía de 60 a 260 mm, y en las épocas secas de 0 a 90 mm.

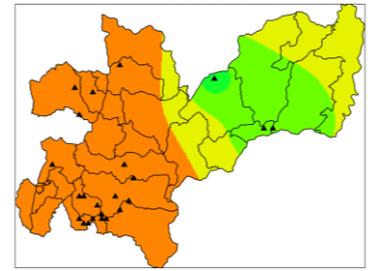
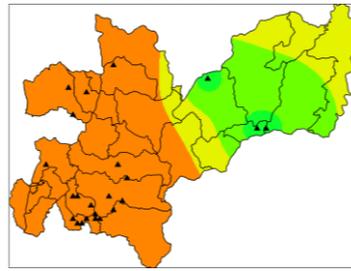
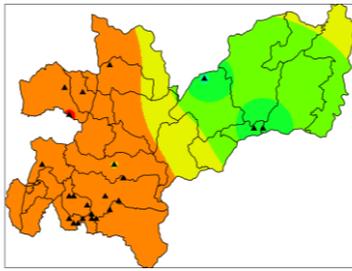
Mes

Decada 1

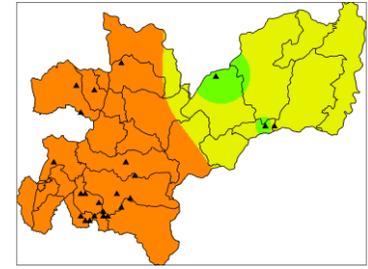
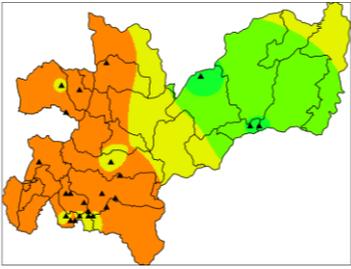
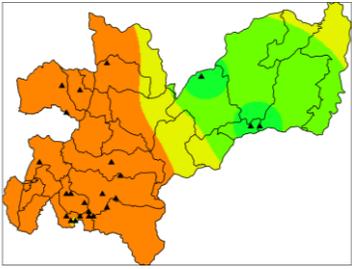
Decada 2

Decada 3

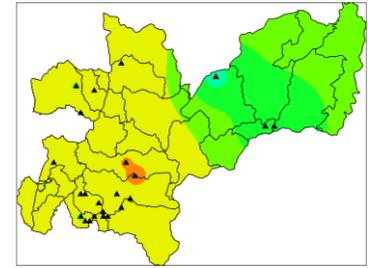
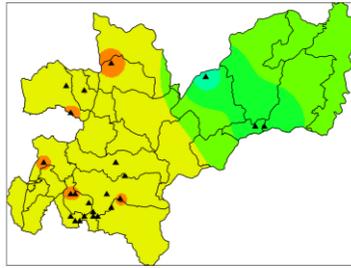
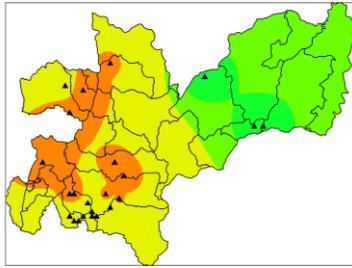
1



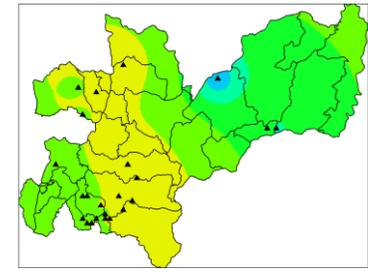
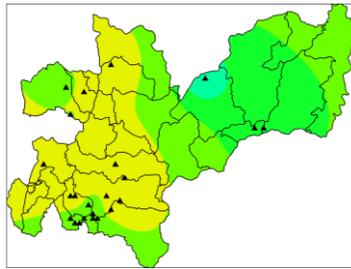
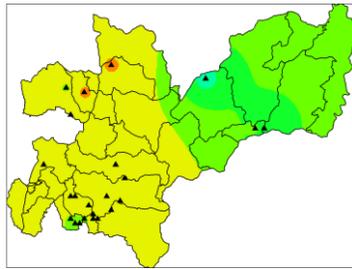
2



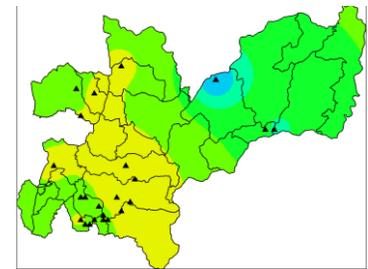
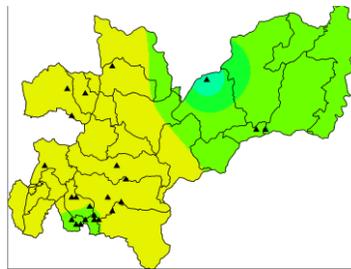
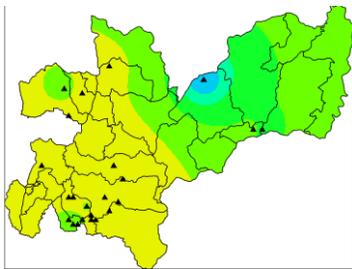
3



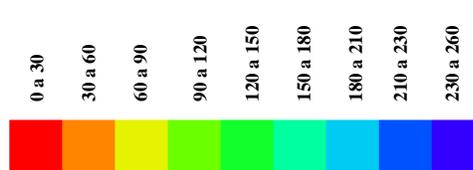
4



5



Precipitación (mm)



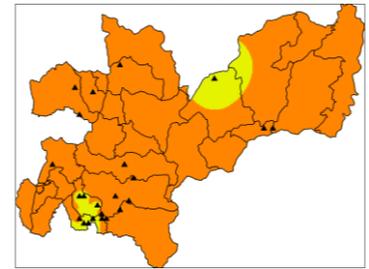
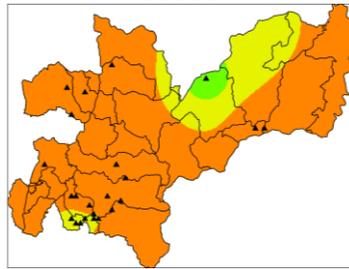
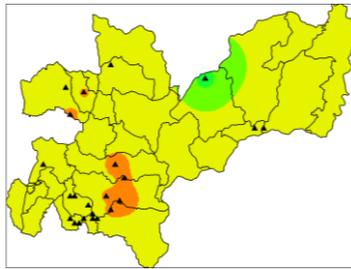
Mes

Decada 1

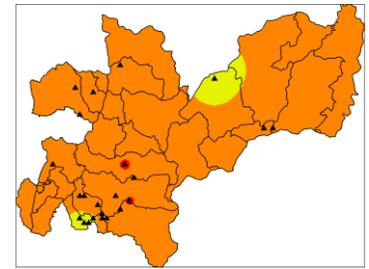
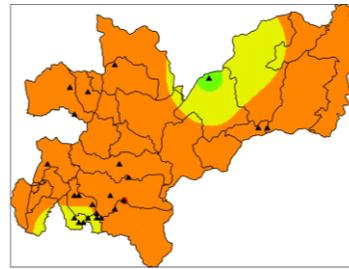
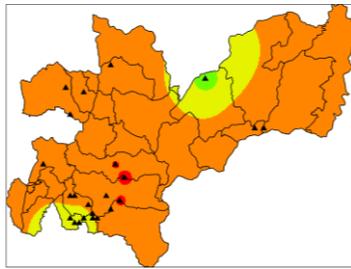
Decada 2

Decada 3

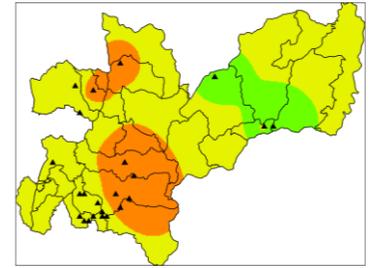
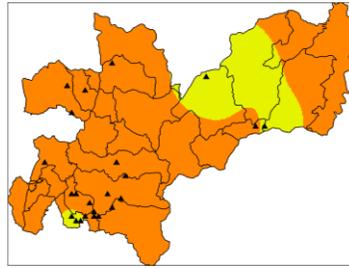
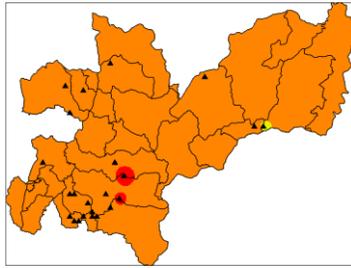
6



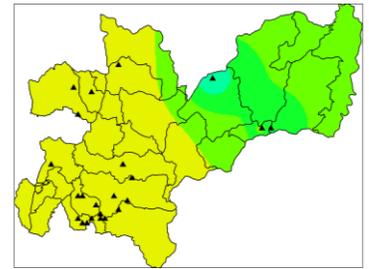
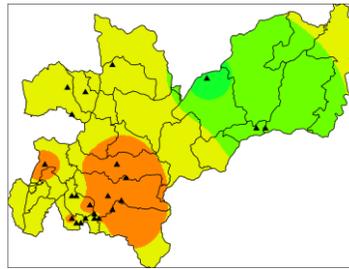
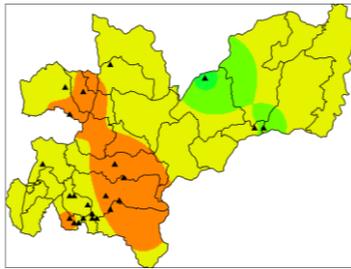
7



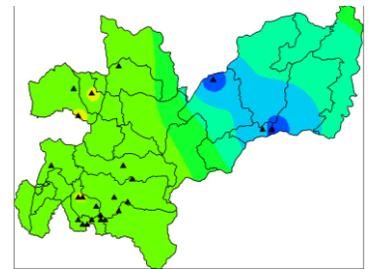
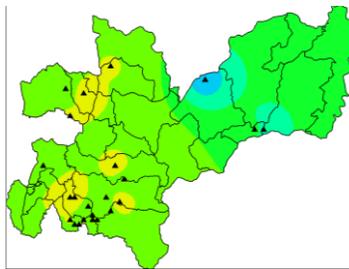
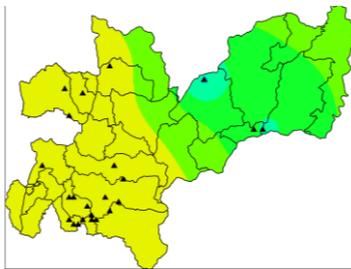
8



9



10



Precipitación (mm)



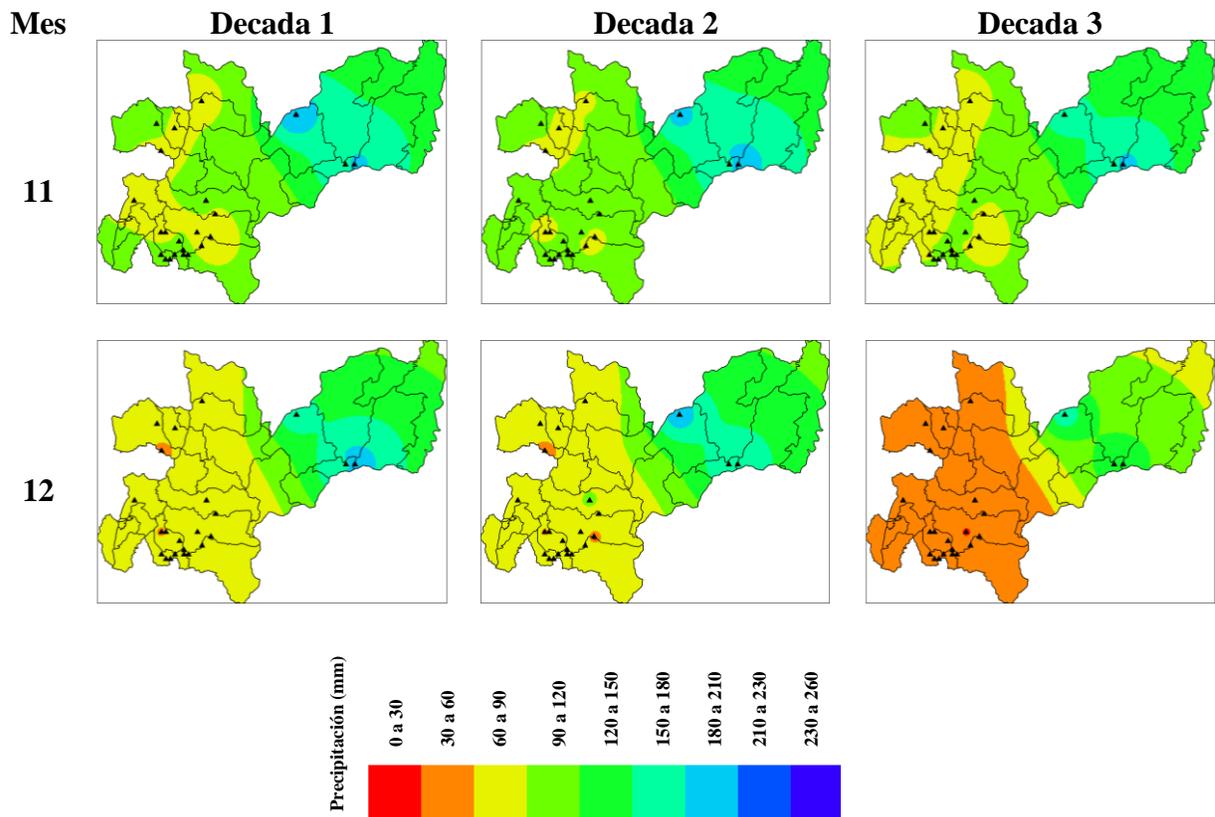


Figura 2.3. Comportamiento decadiario de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.

En enero las tres décadas son muy similares, pero la primera se caracteriza por tener mayores precipitaciones en la zona oriental con respecto a la misma zona en las otras dos décadas, mientras que en el occidente de Caldas oscilan precipitaciones alrededor de los 30 a 60 mm en promedio. La primera década de febrero tiene una distribución espacial muy similar con la primera década de enero, sin embargo, en la segunda década de éste mes se evidencia en algunas áreas un incremento en la precipitación, pero en la tercera década la precipitación disminuye gradualmente. En el mes de marzo, característico por ser un mes de transición de una de las temporadas secas a húmedas en el año, se presenta en las tres décadas un incremento gradual, no obstante, existen algunas áreas en las que las precipitaciones permanecen con valores constantes entre 30 a 60 mm. Abril y mayo hacen parte de la primera temporada húmeda del año, con precipitaciones decadiarias que se encuentran entre 60 a 210 mm, siendo la zona oriente la que presenta mayores precipitaciones. Históricamente la primera década de junio en la mayor parte del territorio Caldense tiene precipitaciones entre

60 y 90 mm, pero algunas zonas muestran precipitaciones menores o mayores a las mencionadas. A partir de la segunda década de junio, hasta la segunda década de agosto, se evidencia la segunda temporada seca del año con precipitaciones constantes a lo largo de las décadas que oscilan en la mayor parte de Caldas entre 30 y 60 mm. Desde la tercera década de agosto hasta la segunda década de septiembre algunas zonas continúan con los valores promedios mencionados, pero en otras áreas del occidente y oriente del departamento hay un aumento gradual en la precipitación. A partir de la tercera década de septiembre hasta la segunda década de diciembre las precipitaciones decadiarias oscilan entre 60 a 260 mm, siendo la tercera década de octubre la más húmeda en todo el año. En noviembre la segunda década se caracteriza por ser más húmeda que las otras dos, y a partir de ésta inicia una importante disminución hacia la primera temporada seca del año, que en el occidente inicia en la tercera década del mes de diciembre.

#### **2.4.2 Prueba de Homogenización Normal Estándar**

Los puntos críticos o de quiebre de la serie fueron detectados mediante la prueba de homogenización normal estándar (SNHT por sus siglas en inglés) modificada por Browning y Hering, (2015). SNHT detectó puntos de cambio en todas las series, pero no todos los puntos de cambio son críticos, ya que se corroboraron con los niveles críticos de la prueba (Tabla 2.2).

Los resultados para las series decadiarias de Caldas indican que los puntos de cambio generalmente fueron observados entre los años de 1972 al 2014 (Figura 2.4), pero en los años 1998 y 2010 (Figura 2.5), hubo una mayor cantidad de estaciones que presentaron puntos críticos. Lo interesante de esto es que en esos años se presentó una condición El Niño, y al comenzar el siguiente año hubo una condición La Niña. De acuerdo a estos resultados, se puede decir que los puntos críticos detectados en las distintas estaciones fueron causados por las variaciones climáticas naturales.

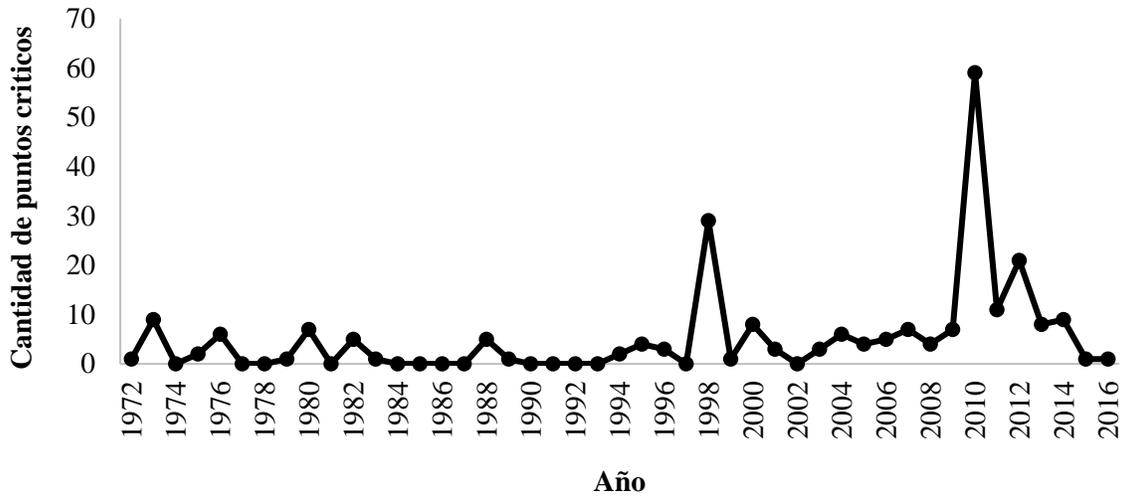


Figura 2.4. Puntos críticos detectados en el año. Fuente: Elaboración propia.

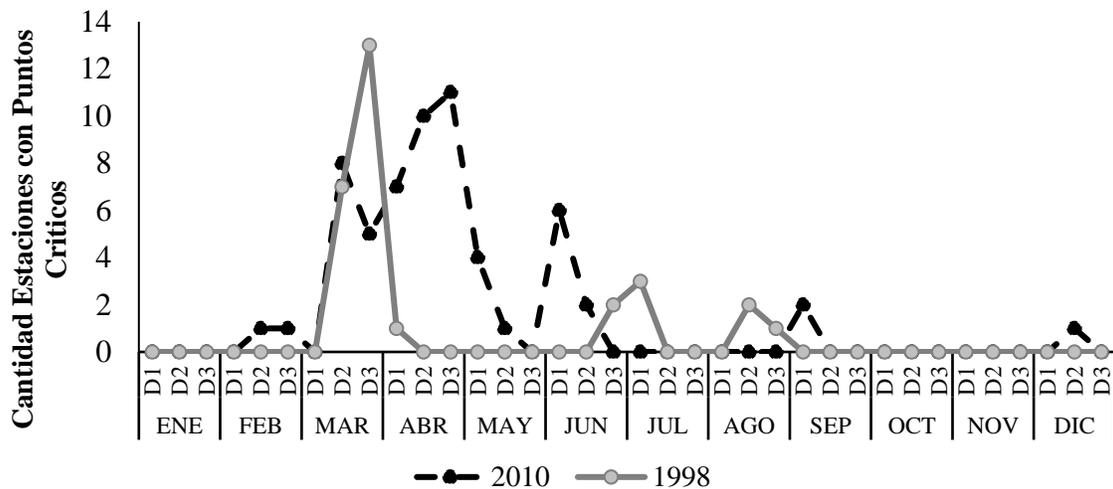


Figura 2.5. Cantidad de estaciones con puntos críticos en los años 1998 y 2010. Fuente: Elaboración propia.

Se investigó si los otros puntos de cambio detectados en el resto de años se debieron a una no homogeneidad en los datos o eran una señal de cambio en la variabilidad natural del régimen de precipitación. Los metadatos de las estaciones analizadas no revelaron ningún cambio en el instrumental o error humano del observador. Por lo tanto, podríamos concluir que los puntos de cambio detectados fueron debidos a la variabilidad natural de la

precipitación que posiblemente podría deberse a cambios en la circulación general a gran escala.

### 2.4.3 Llenado de datos faltantes

#### Agrupación de las estaciones

El análisis de agrupamiento identificó cinco grupos homogéneos de precipitación decadiaria, que muestran la existencia de cinco regiones basadas en regímenes pluviométricos. El resultado de este análisis se muestra generalmente en una ilustración gráfica llamada “Dendrograma” (Figura 2.6), pero para una mejor comprensión de los resultados, en el mapa de Caldas (Figura 2.7) se muestran las estaciones agrupadas con un color y símbolo definido para cada grupo. El patrón decadiario de lluvia de estos 5 grupos puede mostrar diferencia entre los grupos.

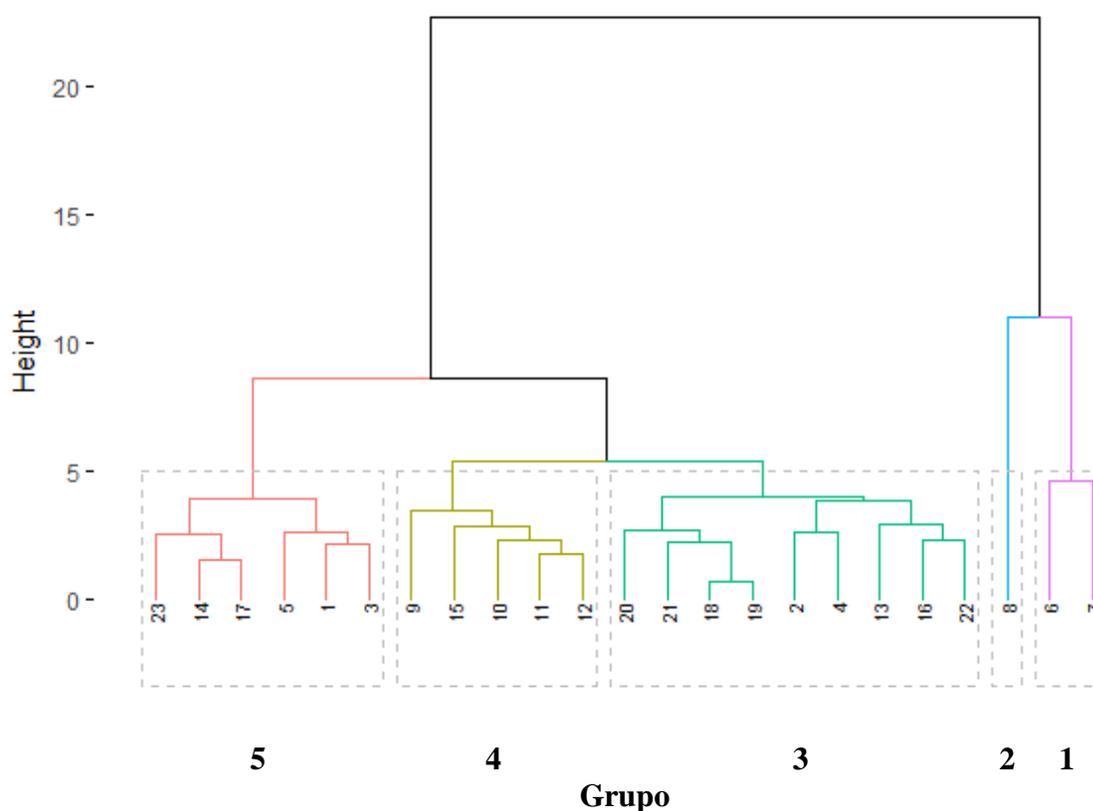


Figura 2.6. Grupos de análisis de conglomerados (Grupo 1, 2, 3, 4 y 5). Dendrograma creado en base a la distancia euclidiana. Fuente: Elaboración propia.

El grupo 1 se compone de dos estaciones situadas al oriente del departamento, sobre la cordillera central, vertiente oriental, y dentro de la cuenca del Medio Magdalena. En promedio la lluvia anual es de 4344 mm, y a nivel decadiario la década con menor precipitación es de 45 mm y la mayor precipitación en 10 días es de 212 mm. La estación Hogar Juvenil, ubicada también al oriente del departamento, en el municipio de Pensilvania, hace parte del grupo 2, pero en promedio su precipitación anual supera los 5000 mm.

El grupo 3 fue compuesto por 6 estaciones ubicadas en la cordillera central vertiente occidental, y por tres estaciones ubicadas en la cordillera occidental vertiente oriental. Las estaciones que conforman este grupo se encuentran principalmente sobre los -75.53 y los -75.78 de Longitud Oeste. Además el 88% de las estaciones se caracterizan por estar ubicadas por debajo de los 1460 msnm. En promedio la lluvia anual de este grupo es de 2413 mm, y la década con mayor precipitación alcanza los 100 mm.

El grupo 4 es muy particular, ya que dentro de este grupo se encuentran 5 estaciones ubicadas en el municipio de Chinchiná, entre los 1267 y 1590 msnm. La lluvia anual de las estaciones que componen este grupo está alrededor de los 2770 mm.

De manera similar al grupo 3, el grupo 5 contiene estaciones ubicadas tanto en la cordillera occidental vertiente oriental como en la cordillera central vertiente occidental. La mayoría de estas estaciones a excepción de dos, están por encima de los 1600 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m), y tienen una lluvia anual promedio de 2060 mm.

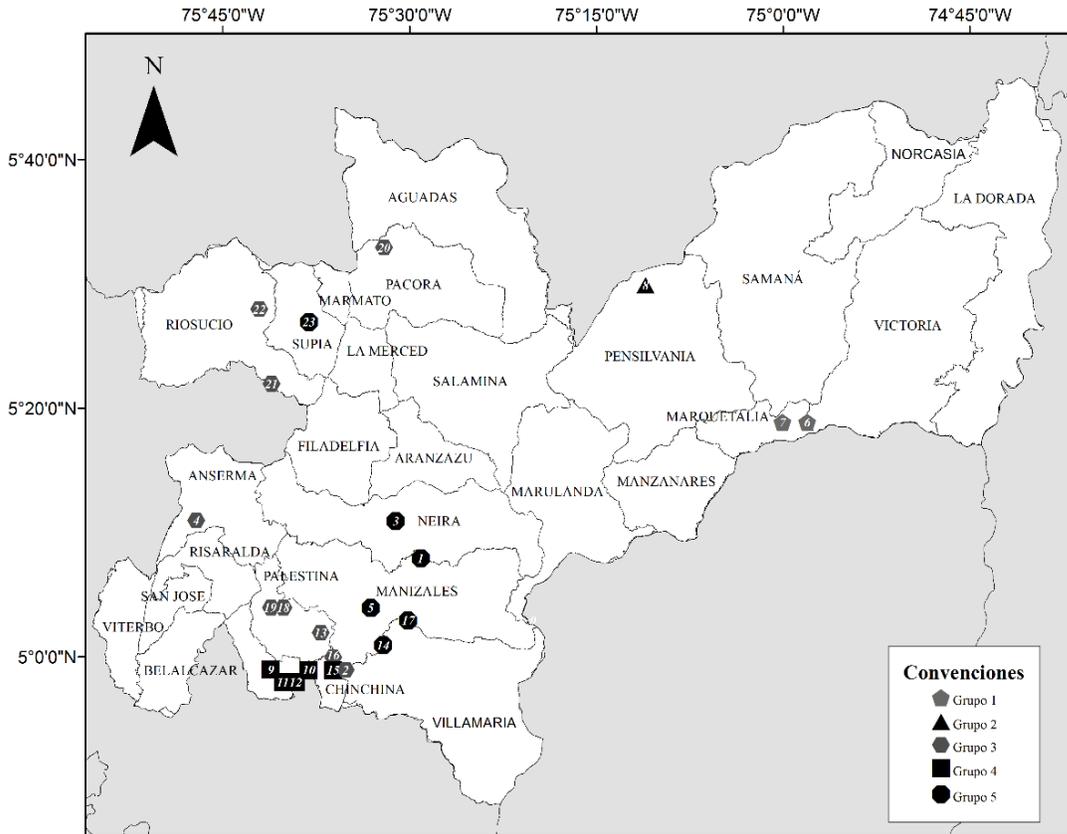


Figura 2.7. Ubicación de estaciones y grupos de precipitación decadiaria homogénea después de la agrupación por el método de Ward. Fuente: Elaboración propia.

Una vez conformados los grupos se procedió a la imputación de datos faltantes por medio del método de la razón.

En la Tabla 2.4 se presentan las estaciones de referencia que se utilizaron para la imputación de datos faltantes.

Tabla 2.4. Estaciones con datos faltantes. Fuente: Elaboración propia.

Código	Estación con datos faltantes	Estación de referencia	Porcentaje Datos Faltantes
2018	El Pistacho	La Juliana	3
2302002	La Pastorita	Santa Helena	12
2302503	Santa Helena	Hogar juvenil	1

<b>Código</b>	<b>Estación con datos faltantes</b>	<b>Estación de referencia</b>	<b>Porcentaje Datos Faltantes</b>
2305036	Hogar Juvenil	Santa Helena	3
2613037	La Francia	El Recreo	3
2613047	La Sierra	La Romelia	1
2615010	La Margarita	Cenicafé	1
2615035	Java	Rafael Escobar	3
2615505	Agronomía	Rafael Escobar	1
2616027	La Linda	Santágueda	9
2617013	La Manuelita	Santágueda	2
2617032	La Argentina	Cenicafé	1

#### **2.4.4 Período seco, húmedo y muy húmedo.**

##### **Modelo cadena de Markov de primer orden y tres estados**

Después de la identificación de los 5 grupos (Figura 2.6), se escogieron tres estaciones de diferentes grupos para realizar la validación de los modelos. La primera estación es La Pastorita, del grupo 1, ubicada en la región Oriental a 1122 msnm, y con una precipitación promedio anual de 4632mm; La Linda, del grupo 3, ubicada en la región Norte del departamento a 1750 msnm y con una precipitación promedio anual de 2232 mm; y Naranjal, ubicada en la región sur del departamento a 1381 msnm, con una precipitación promedio anual de 2783 mm.

Los resultados revelan que para la estación La Pastorita, la probabilidad de ocurrencia de décadas húmedas y muy húmedas en un evento El Niño fue baja desde la segunda década del mes de junio hasta la primera década del mes de septiembre. Bajo condiciones Neutras y La Niña las probabilidades de ocurrencia de décadas húmedas y muy húmedas siempre están por encima del 50%, excepto en la segunda década del mes de junio y la tercera década del mes de julio bajo condiciones Neutrales, donde las probabilidades están por debajo del 50% de que se presenten décadas húmedas y muy húmedas. Un resultado destacado es que desde la tercera década del mes de marzo hasta la tercera década del mes de abril, las probabilidades de que se presenten condiciones húmedas y muy húmedas son del 100% durante condiciones

El Niño, mientras que en condiciones La Niña las probabilidades son menores, y están alrededor del 73 al 100%.

En la estación La Linda, la probabilidad de que una década sea húmeda o muy húmeda es en promedio del 70% durante condiciones Neutrales, 81% durante condiciones La Niña, y 58% en condiciones El Niño. La influencia de un evento El Niño sobre la probabilidad de décadas húmedas es mayor en esta estación que para Naranjal y Santa Helena. A partir de la tercera década del mes de diciembre hasta la tercera década del mes de febrero, las últimas dos décadas del mes de junio y desde la tercera década del mes de julio hasta la tercera década del mes de agosto, las probabilidades de que se presenten condiciones húmedas y muy húmedas están por debajo del 45% bajo condiciones El Niño y, con respecto a condiciones Neutras, disminuye hasta en un 40% la probabilidad para algunas décadas.

En la estación Naranjal se encontró que la probabilidad de que una década sea húmeda o muy húmeda es en promedio del 82% durante condiciones Neutrales, 89% durante condiciones La Niña, y 72% en condiciones El Niño. Tan solo en 6 décadas distribuidas a lo largo del año se presentan probabilidades de décadas húmedas o muy húmedas por debajo del 46%.

Es importante destacar que los resultados de este estudio concuerdan con el trabajo previo de Jaramillo R., (1985), quien utilizó las Cadenas de Markov para conocer la probabilidad y la continuidad de los períodos húmedos en la zona cafetera colombiana.

**Tabla 2.5.** Probabilidades iniciales de décadas húmedas y muy húmedas en tres estaciones del departamento de Caldas.  $P(H \text{ y } MH) = \text{Probabilidad de décadas húmedas y muy húmedas. Fuente: Elaboración propia.}$

Mes	Década	Probabilidad inicial (%) P(H y MH)								
		La Pastorita			Naranjal			La Linda		
		El Niño	La Niña	Neutro	El Niño	La Niña	Neutro	El Niño	La Niña	Neutro
1	1	75	100	77	27	88	64	27	73	64
1	2	75	73	85	55	81	59	45	55	45
1	3	67	73	85	45	88	73	18	82	27
2	1	78	89	78	60	86	81	25	56	38
2	2	89	89	78	60	86	69	25	56	50

		Probabilidad inicial (%) P(H y MH)								
Mes	Década	La Pastorita			Naranjal			La Linda		
		El Niño	La Niña	Neutro	El Niño	La Niña	Neutro	El Niño	La Niña	Neutro
2	3	78	89	78	53	79	66	38	67	44
3	1	71	100	82	82	92	78	83	100	50
3	2	86	100	95	55	92	78	50	86	65
3	3	100	86	77	100	92	86	50	71	75
4	1	100	80	92	91	100	98	50	60	77
4	2	100	100	96	100	75	98	83	60	91
4	3	100	80	100	91	100	100	83	80	91
5	1	88	100	82	83	90	92	83	100	86
5	2	88	83	100	100	100	92	50	100	90
5	3	100	83	86	100	90	97	100	100	81
6	1	67	75	74	77	78	100	86	100	86
6	2	22	75	35	46	89	85	43	75	59
6	3	11	75	52	69	100	74	29	75	64
7	1	33	80	48	70	73	70	60	60	61
7	2	33	60	52	50	73	73	60	80	52
7	3	33	80	32	70	100	70	40	80	57
8	1	43	86	73	73	75	71	33	71	57
8	2	29	86	50	45	92	68	17	86	57
8	3	14	86	91	55	92	79	33	100	71
9	1	78	100	89	43	86	85	63	78	82
9	2	78	89	83	86	93	76	63	100	76
9	3	89	100	100	93	93	88	88	89	88
10	1	100	91	93	78	94	96	80	91	92
10	2	91	100	100	94	88	88	100	91	85
10	3	100	100	100	100	100	96	70	82	92
11	1	100	100	100	90	100	96	90	100	100
11	2	100	100	92	90	94	100	90	92	100
11	3	91	83	100	95	100	96	80	75	92
12	1	92	100	100	73	74	90	55	85	70
12	2	92	100	82	59	84	70	64	92	50
12	3	75	100	91	45	84	55	27	69	40

#### **2.4.5 Comparación entre Suemulador y Modelo de cadena de Markov de primer orden y tres estados.**

Con el fin de ejecutar ambos modelos se utilizó toda la serie histórica de las 3 estaciones: La Pastorita, La Linda y Naranjal. El año de evaluación fue el 2016, y para los datos observados de las 36 décadas se identificó la condición por medio del criterio planteado por Jaramillo R., A. et al. (2011b).

Suemulador estimó los datos de precipitación de las 36 décadas del año 2016 para cada estación, teniendo disponible la condición del Océano Pacífico (ONI) y toda la serie histórica de lluvia de las estaciones. Para cada estación se hizo un total de 36 corridas, donde en cada corrida sólo se llenaban los datos de 10 días. Se realizó la acumulación de lluvia por décadas, y se identificó para cada decadiaria simulada la condición de acuerdo al criterio planteado por Jaramillo R., A. et al., (2011).

Se utilizó el modelo de desarrollo propio para simular la condición en cada década del año 2016, utilizando la matriz de transición trimestral de acuerdo al mes, acondicionando las probabilidades de estados húmedos, muy húmedos o secos. Éste método puede reproducir la dependencia a corto plazo, lo que promueve a la alternancia entre estados.

Para el modelo de desarrollo propio, basado en la cadena de Markov de primer orden, fue identificada la condición de las 36 décadas del año de acuerdo a la matriz de transición del trimestre correspondiente (Tabla 2.6). Se puede ver que las probabilidades condicionales de estados no son iguales y varían estacionalmente, esto indicaría que el método logra reproducir la dependencia a corto plazo. El enfoque utilizado para la simulación reproduce, según el mes, la alternancia de décadas húmedas, muy húmedas y secas observadas en la serie histórica.

Los resultados de ambos modelos, basados en cadenas de Markov, se compararon con respecto a lo registrado en el año 2016. Los resultados obtenidos con Suemulador, una vez obtenidos los datos simulados de lluvia, fueron diferentes del modelo de desarrollo propio.

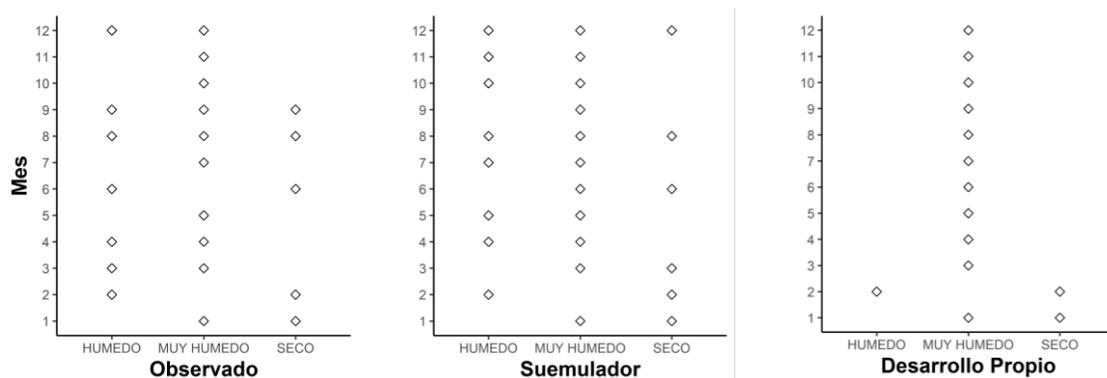
Éste último presento mejor desempeño en la reproducción de periodos secos, húmedos y muy húmedos.

*Tabla 2.6. Probabilidades condicionales de estado. Matrices de transición trimestrales para las estaciones Naranjal, La Linda y La Pastorita. Fuente: Elaboración propia.*

Mes	Matriz de Transición referencia		Naranjal			La Linda			La Pastorita		
			Seco	Húmedo	Muy Húmedo	Seco	Húmedo	Muy Húmedo	Seco	Húmedo	Muy Húmedo
Enero, Febrero	DEF	Seco	0,40	0,32	0,28	0,59	0,21	0,20	0,45	0,14	0,40
		Húmedo	0,34	0,36	0,30	0,45	0,33	0,22	0,14	0,11	0,76
		Muy Húmedo	0,28	0,26	0,47	0,38	0,21	0,41	0,12	0,14	0,74
Marzo, Abril	FMA	Seco	0,29	0,24	0,47	0,42	0,25	0,33	0,22	0,16	0,62
		Húmedo	0,17	0,35	0,48	0,24	0,25	0,51	0,11	0,11	0,78
		Muy Húmedo	0,11	0,22	0,67	0,27	0,26	0,47	0,09	0,13	0,78
Abril, Mayo	MAM	Seco	0,04	0,24	0,72	0,25	0,28	0,47	0,08	0,04	0,88
		Húmedo	0,08	0,28	0,64	0,21	0,21	0,58	0,14	0,22	0,64
		Muy Húmedo	0,08	0,19	0,73	0,17	0,27	0,56	0,07	0,12	0,81
Mayo, Junio	AMJ	Seco	0,11	0,25	0,64	0,28	0,34	0,38	0,49	0,11	0,40
		Húmedo	0,11	0,25	0,64	0,26	0,19	0,55	0,33	0,20	0,48
		Muy Húmedo	0,09	0,22	0,69	0,14	0,34	0,52	0,14	0,14	0,72
Julio, Agosto	JJA	Seco	0,34	0,31	0,36	0,48	0,31	0,20	0,58	0,18	0,24
		Húmedo	0,27	0,32	0,42	0,38	0,24	0,38	0,46	0,17	0,37
		Muy Húmedo	0,22	0,28	0,50	0,33	0,27	0,40	0,33	0,19	0,48
Septiembre, Octubre	ASO	Seco	0,20	0,27	0,53	0,31	0,33	0,36	0,34	0,20	0,46
		Húmedo	0,22	0,18	0,61	0,15	0,26	0,58	0,24	0,16	0,60
		Muy Húmedo	0,12	0,24	0,64	0,19	0,18	0,64	0,06	0,13	0,81
Octubre, Noviembre	SON	Seco	0,04	0,30	0,66	0,18	0,24	0,59	0,13	0,13	0,73
		Húmedo	0,13	0,17	0,70	0,08	0,22	0,69	0,11	0,09	0,80
		Muy Húmedo	0,07	0,21	0,71	0,12	0,20	0,67	0,03	0,08	0,88
Noviembre, Diciembre	OND	Seco	0,23	0,29	0,48	0,37	0,24	0,39	0,27	0,09	0,64
		Húmedo	0,21	0,26	0,52	0,18	0,29	0,54	0,03	0,10	0,86
		Muy Húmedo	0,11	0,22	0,67	0,18	0,19	0,63	0,04	0,10	0,87

Para cada estación se identificó por mes las distintas condiciones que se pueden presentar. Los datos observados en el 2016 para la estación Naranjal nos indican que en el mes de enero hubo tanto décadas muy húmedas como secas. En febrero y junio hubo condiciones húmedas y secas en el mes, mientras que en marzo, abril y diciembre las décadas estuvieron siempre

bajo condiciones húmedas y muy húmedas. En mayo, julio, octubre y noviembre las tres décadas tuvieron condiciones muy húmedas. En los meses de agosto y septiembre se presentaron las tres condiciones. Los resultados que se obtuvieron utilizando Suemulador, coinciden con los observados en los meses de enero, abril y agosto, mientras que los obtenidos con las matrices de transición coinciden con los observados en los meses de enero, febrero, mayo, julio, octubre y noviembre (Figura 2.8).



*Figura 2.8. Comparación de los estados de humedad en la Estación Naranjal. Fuente: Elaboración propia.*

De la Figura 2.9 se desprende que, en el año 2016, en la estación La Linda, los meses de enero y febrero presentaron solo décadas secas. En marzo y junio hubo tanto décadas secas como húmedas, mientras que en mayo y octubre hubo presencia de secas y muy húmedas. Tan solo en el mes de abril hubo alternancia entre las tres condiciones. Los meses donde se presentaron décadas húmedas y muy húmedas fueron julio, septiembre, noviembre y diciembre. Los resultados obtenidos utilizando Suemulador, reflejan consistencia con los observados, particularmente en los meses de enero, mayo, septiembre y noviembre. Por otra parte, los resultados obtenidos con el modelo de desarrollo propio, coinciden con lo observado solamente en los meses de enero y febrero.

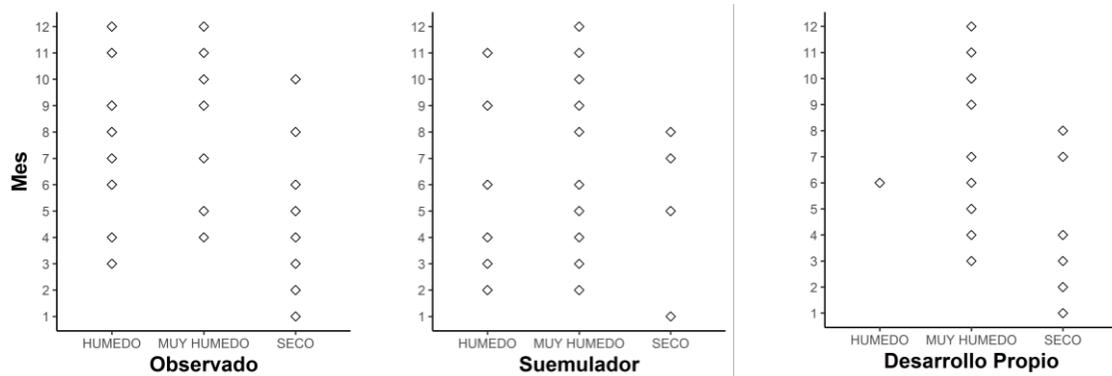


Figura 2.9. Comparación de los estados de humedad en la Estación La Linda. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2.10 ilustra los resultados para la estación La Pastorita. En el año 2016, las décadas de los meses de enero y julio, presentaron condiciones húmedas y secas, mientras que las décadas de los meses de marzo, mayo y junio presentaron condiciones tanto muy húmedas y secas. Los meses que presentaron las tres décadas muy húmedas fueron febrero, abril, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La alternancia entre décadas húmedas, muy húmedas y secas se presentó sólo en el mes de agosto. En los resultados se puede evidenciar que utilizando Suemulador hay consistencia con lo observado en los meses de marzo, octubre y noviembre; y utilizando el modelo de desarrollo propio hubo consistencia con lo observado en los meses de abril, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

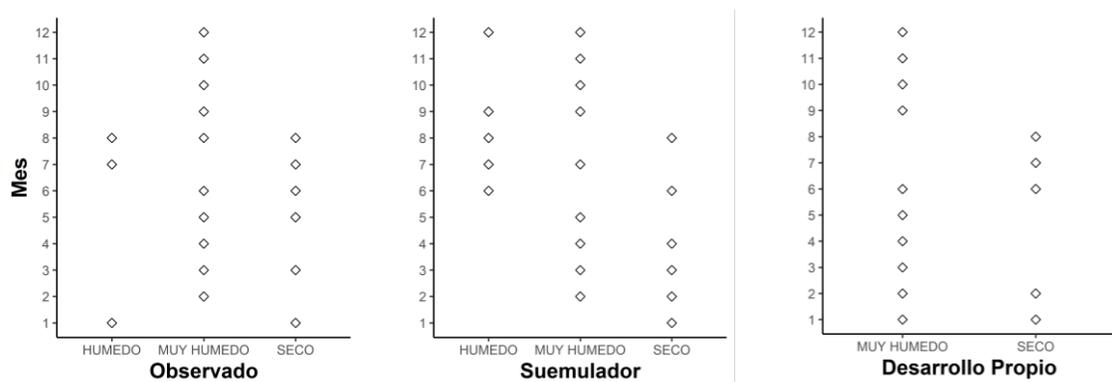


Figura 2.10. Comparación de los estados de humedad en la Estación La Pastorita. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados anteriores sólo permiten conocer cómo fue el funcionamiento de los modelos con respecto a cada década. Sin embargo, los resultados son promisorios y muestran la

importancia de afinar el modelo de desarrollo propio, tal vez realizando matrices de transición bimensual, en vez de trimestral como se implementó en este trabajo, con el fin de ajustar los resultados del modelo a mejores exactitudes de las condiciones o estados.

La significancia en la variación de ocurrencia de las distintas condiciones identificadas por cada modelo durante el año 2016 para todas las décadas, se evaluó estadísticamente de acuerdo con la prueba de Chi – cuadrado y la prueba de Fisher.

Con base en los resultados de la prueba de bondad de ajuste y en la prueba de Fisher, mostrados en las tablas 2.7 y 2.8, el modelo de desarrollo propio proporciona un buen ajuste de las condiciones secas, húmedas y muy húmedas observadas en las estaciones Naranjal y La Pastorita, debido a que el p- valor es menor que 5%, por lo que se rechaza la hipótesis nula de independencia de las variables. Suemulador no proporcionó un buen ajuste a las condiciones observadas en ninguna de las tres estaciones. Estos resultados contrastan con lo que algunos autores (Grondona et al., 2000; Wilks, 1989b) han encontrado en sus estudios, señalando que los modelos estocásticos tienen deficiencias por utilizar un orden incorrecto para el proceso de Markov, lo que promueve a subestimar la varianza observada, mientras que los modelos que están condicionados a ENSO tienden a reproducir en mayor proporción la varianza observada.

*Tabla 2.7. Prueba de bondad de ajuste  $X^2$ . Fuente: Elaboración propia.*

	Naranjal			La Linda			La Pastorita		
	$X^2$	<i>df</i>	<i>p - valor</i>	$X^2$	<i>df</i>	<i>p - valor</i>	$X^2$	<i>df</i>	<i>p - valor</i>
<b>Suemulador</b>	2,13	4	0,71	1,21	4	0,87	6,25	4	0,18
<b>Desarrollo Propio</b>	10,26	4	0,03	9,04	4	0,06	15,79	2	0,00

Tabla 2.8. Prueba Fisher. Fuente: Elaboración propia.

	<b>Naranjal</b>	<b>La Linda</b>	<b>La Pastorita</b>
	<i>p - Valor</i>	<i>p - Valor</i>	<i>p - Valor</i>
<b>Suemulador</b>	0,76	0,91	0,14
<b>Desarrollo Propio</b>	0,02	0,03	0,00

Aún quedan preguntas a resolver, debido a que tanto el modelo de desarrollo propio, como Suemulador que está condicionado a las fases de ENOS, no lograron reproducir al 100% los periodos secos, húmedos y muy húmedos observados en el año 2016. No obstante, se podrían mejorar, utilizando un enfoque multi-modelo para mejorar la capacidad predictiva de los periodos.

Estos resultados apoyan las ideas de otras investigaciones (Cowden et al., 2008; Sonnadara and Jayewardene, 2015; Yengoh et al., 2010), quienes han utilizado cadenas de Markov de primer orden, concluyendo que las cadenas concuerdan con la variabilidad interanual de la precipitación, reproduciendo adecuadamente los periodos secos y húmedos en el año y son adecuadas para calcular el número de días con sequía después del periodo de siembra.

Sin embargo existen estudios (Basinger et al., 2010) que cuestionan la idoneidad de los modelos de Markov, afirmando que estos modelos son altamente sensibles a los datos faltantes, y que el orden de la cadena de Markov parece influir en la precisión estacional de la generación de lluvia.

A pesar que son pocos los estudios en Colombia que han utilizado cadenas de Markov para la caracterización de periodos secos y húmedos, existen investigaciones que han considerado el cálculo de probabilidades empíricas a partir de una cadena de Markov de primer orden para la imputación de datos, con el fin de preservar la generación de valores de precipitación igual a cero, demostrando un buen desempeño.

## 2.5 Discusión y conclusiones

Se evaluó el desempeño de dos modelos que funcionan con cadenas de Markov, uno comúnmente utilizado para simular datos faltantes de precipitación diaria. Éste último basado en un proceso estocástico, utiliza un modelo de cadena de Markov de segundo orden para simular la aparición de precipitación, y una distribución teórica de probabilidad para simular cantidades diarias de precipitación. El modelo de desarrollo propio basado en la cadena de Markov de primer orden, simula la aparición de décadas húmedas, muy húmedas y secas, teniendo en cuenta matrices de transición trimestrales. El rendimiento de éste modelo es consistentemente mejor que la de Suemulador, especialmente cuando se revisa el resultado por década. Suemulador se comportó mejor que el modelo de desarrollo propio en los resultados a nivel mensual en la estación La Linda. Sin embargo, cuando se revisaron los resultados de Suemulador década por década con respecto a lo observado, se concluye que hay independencia entre lo simulado y lo observado. El modelo de desarrollo propio es consistentemente mejor que Suemulador, en la reproducción de estados secos, húmedos y muy húmedos en las estaciones que tienen precipitaciones anuales por encima de 1100 mm.

Este estudio indica, además, que el rendimiento de un modelo es dependiente del lugar, y que debe realizarse la validación, sobre todo para estudios en nuevas regiones.

Los modelos basados en cadenas de Markov son adecuados para la generación de ocurrencia de periodos secos, húmedos y muy húmedos en Caldas. El rendimiento global de la cadena de Markov de primer orden simula satisfactoriamente los diferentes estados utilizados en este estudio.

## 2.6 Bibliografía

- Ababaei, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F., 2014. Preserving spatial linear correlations between neighboring stations in simulating daily precipitation using extended Markov models. *Theor. Appl. Climatol.* 118, 195–202. doi:10.1007/s00704-013-1059-x
- Alexandersson, H., Moberg, A., 1997. Homogenization of Swedish Temperature Data. Part I: Homogeneity Test for Linear Trends. *Int. J. Climatol.* 17, 25–34. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199701)17:1<25::AID-JOC103>3.0.CO;2-J
- Baigorria, G.A., Jones, J.W., 2010. GiST: A Stochastic Model for Generating Spatially and Temporally Correlated Daily Rainfall Data. *J. Clim.* 23, 5990–6008. doi:10.1175/2010JCLI3537.1
- Bardossy, A., Plate, E.J., 1992. Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns. *Water Resour. Res.* 28, 1247–1259. doi:10.1029/91WR02589
- Basinger, M., Montalto, F., Lall, U., 2010. A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *J. Hydrol.* 392, 105–118. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.039
- Browning, J.M., Hering, A.S., 2015. Simultaneous treatment of random and systematic errors in the historical radiosonde temperature archive. Colorado School of Mines, Colorado.
- Burton, A., Kilsby, C.G., Fowler, H.J., Cowpertwait, P.S.P., O’Connell, P.E., 2008. RainSim: A spatial–temporal stochastic rainfall modelling system. *Environ. Model. Softw.* 23, 1356–1369. doi:10.1016/j.envsoft.2008.04.003
- Cabarcas, R., Carmen, A. del, Caicedo, P., Daniel, J., 2013. Effect of the El Niño and La Niña Phenomena on Precipitation and Agricultural Production in the Department of Atlántico (Colombia). *Cuad. Geogr. - Rev. Colomb. Geogr.* 22, 35–54.
- Camberlin, P., Janicot, S., Pocard, I., 2001. Seasonality and atmospheric dynamics of the teleconnection between African rainfall and tropical sea-surface temperature: Atlantic vs. ENSO. *Int. J. Climatol.* 21, 973–1005. doi:10.1002/joc.673
- Chen, F.-W., Liu, C.-W., 2012. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environ.* 10, 209–222. doi:10.1007/s10333-012-0319-1
- Chica Ramírez, H.A., Peña Quiñones, A.J., Giraldo Jiménez, J.F., Obando Bonilla, D., Riaño Herrera, N.M., 2014. Suemulador: herramienta para la simulación de datos faltantes en series climáticas diarias de zonas ecuatoriales. Suemulador: a tool for missing data simulation of climatic series in equatorial zones. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín Vol 67 Núm 2 2014 7365-7373 2248-7026 0304-2847.*

- Chowdhury, R.K., Beecham, S., 2013. Characterization of rainfall spells for urban water management. *Int. J. Climatol.* 33, 959–967. doi:10.1002/joc.3482
- Cowden, J.R., Watkins, D.W., Mihelcic, J.R., 2008. Stochastic rainfall modeling in West Africa: Parsimonious approaches for domestic rainwater harvesting assessment. *J. Hydrol.* 361, 64–77. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.025
- Everitt, B., Dunn, G., *Economics, A.B. of I.*, 1991. *Applied multivariate data analysis.*
- Fisher, R.A., 1922. On the Interpretation of  $\chi^2$  from Contingency Tables, and the Calculation of P. *J. R. Stat. Soc.* 85, 87–94. doi:10.2307/2340521
- FNC, 2017. Estadísticas Historicas | Federación Nacional de cafeteros [WWW Document]. URL [https://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/quienes\\_somos/119\\_estadisticas\\_historicas/](https://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/) (accessed 7.12.17).
- Frost, A.J., Charles, S.P., Timbal, B., Chiew, F.H.S., Mehrotra, R., Nguyen, K.C., Chandler, R.E., McGregor, J.L., Fu, G., Kirono, D.G.C., Fernandez, E., Kent, D.M., 2011. A comparison of multi-site daily rainfall downscaling techniques under Australian conditions. *J. Hydrol.* 408, 1–18. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.06.021
- Fu, X., Kuo, C.C., Gan, T.Y., 2015. Change point analysis of precipitation indices of Western Canada. *Int. J. Climatol.* 35, 2592–2607. doi:10.1002/joc.4144
- Gabriel, K.R., Neumann, J., 1962. A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 88, 90–95. doi:10.1002/qj.49708837511
- Gíl, M.M., Quiceno, N., Poveda, G., 1998. Efecto del ENSO y la NAO sobre el ciclo anual de la hidrología de Colombia: análisis de correlación, reanálisis de NCEP/NCAR y modelos de pronóstico. *Av. En Recur. Hidráulicos* 41–53.
- Grondona, M.O., Podestá, G.P., Bidegain, M., Marino, M., Hordij, H., 2000. A Stochastic Precipitation Generator Conditioned on ENSO Phase: A Case Study in Southeastern South America. *J. Clim.* 13, 2973–2986. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2973:ASPGCO>2.0.CO;2
- Guevara D., J., 2003. *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos.* CDCH UCV.
- Halder, D., Panda, R.K., Srivastava, R.K., Kheroar, S., Singh, S.P., 2016. Stochastic analysis of rainfall and its application in appropriate planning and management for Eastern India agriculture. *Water Policy* 18, 1155–1173. doi:10.2166/wp.2016.240
- Harrold, T.I., Sharma, A., Sheather, S.J., 2003. A nonparametric model for stochastic generation of daily rainfall occurrence. *Water Resour. Res.* 39, 1300. doi:10.1029/2003WR002182
- Hastenrath, S., 2002. The intertropical convergence zone of the eastern Pacific revisited. *Int. J. Climatol.* 22, 347–356. doi:10.1002/joc.739

- Hastenrath, S., 1991. Regional Circulation Systems, in: *Climate Dynamics of the Tropics*. Springer Netherlands, pp. 114–218.
- Hastenrath, S., 1990. Tropical Climate Prediction: A Progress Report, 1985–90. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 71, 819–825. doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0819:TCPAPR>2.0.CO;2
- Hughes, J.P., Guttorp, P., 1994. A class of stochastic models for relating synoptic atmospheric patterns to regional hydrologic phenomena. *Water Resour. Res.* 30, 1535–1546. doi:10.1029/93WR02983
- Hughes, J.P., Guttorp, P., Charles, S.P., 1999. A non-homogeneous hidden Markov model for precipitation occurrence. *J. R. Stat. Soc. Ser. C Appl. Stat.* 48, 15–30. doi:10.1111/1467-9876.00136
- Jahangir Alam, A.T.M., Saadat, A.H.M., Sayedur Rahman, M., Rahman, S., 2014. Spatio-Temporal Variation of Agricultural Drought in the Barind Region of Bangladesh: An Application of a Markov Chain Model. *Irrig. Drain.* 63, 383–393. doi:10.1002/ird.1800
- Jaramillo R., A., 2007. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Rev. Cenicafé* 57, 288–298.
- Jaramillo R., A., 1985. Continuidad de los períodos húmedos en la zona cafetera. *Cenicafé* 36, 125–138.
- Jaramillo R., A., Arcila P., J., 2009. Variabilidad climática en la zona cafetera Colombiana asociada al evento de El Niño y su efecto en la caficultura. *Av. Téc. Cenicafé*.
- Jaramillo R., A., Arcila P., J., 1996. Epocas recomendables para la siembra de los cafetos.
- Jaramillo R., A., Ramirez B., V.H., Arcila P., J., 2011a. Patrones de distribución de la lluvia en la zona cafetera.
- Jaramillo R., A., Ramirez B., V.H., Arcila P., J., 2011b. Distribución de la lluvia : Clave para planificar las labores en el cultivo del café en Colombia.
- Jones, P.G., Thornton, P.K., 2000. MarkSim. *Agron. J.* 92, 445. doi:10.2134/agronj2000.923445x
- Lopez Elias, J., Tijerina Chavez, L., Haro Aguilar, G., Ramirez, A., R, R., 1991. Evaporation of a reference lucerne cultivar for empirical formulas valuation at Montecillo area, Mexico, State. *Ser. Agua-Suelo-Clima*.
- Marshall, L., Nott, D., Sharma, A., 2004. A comparative study of Markov chain Monte Carlo methods for conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resour. Res.* 40, W02501. doi:10.1029/2003WR002378

- Mehrotra, R., Sharma, A., 2007a. Preserving low-frequency variability in generated daily rainfall sequences. *J. Hydrol.* 345, 102–120. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.08.003
- Mehrotra, R., Sharma, A., 2007b. A semi-parametric model for stochastic generation of multi-site daily rainfall exhibiting low-frequency variability. *J. Hydrol.* 335, 180–193. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.11.011
- Mehrotra, R., Sharma, A., 2005. A nonparametric nonhomogeneous hidden Markov model for downscaling of multisite daily rainfall occurrences. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 110, D16108. doi:10.1029/2004JD005677
- Méndez González, J., Ramírez Leyva, A., Cornejo Oviedo, E., Zárate Lupercio, A., Cavazos Pérez, T., 2011. Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investig. Geográficas* 0.
- Montealegre B, J.E., Pabón C., J.D., 2000. La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña– Oscilacion del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorol. Colomb.* 2, 7–21.
- Pandey, S., Kumar, M., Chakraborty, S., Mahanti, N.C., 2011. Analysing the Variability of Rainfall for Drought Prognosis in Jharkhand State: A Statistical Approach. *Irrig. Drain.* 60, 556–566. doi:10.1002/ird.627
- Peña Q., A., Cortes Betancourt, E., Montealegre León, F., 2001. INCIDENCIA DE LOS FENÓMENOS “EL NIÑO” Y “LA NIÑA” SOBRE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL VALLE DEL RÍO CAUCA PARTE II-Análisis de Correlaciones.
- Peña-Q, A., Bermudez-F, L., Ramírez-C, C., Riaño-H, N., 2015. Oceanic Niño Index as a Tool to Determine the Effect of Weather on Coffee Plantation in Colombia. *Am. J. Exp. Agric.* 7, 395–404. doi:10.9734/AJEA/2015/15876
- Peña-Q, A.J., Ramírez-C, C., Bermúdez-F, L.N., Riaño-H, N.M., 2016. Rainfall Patterns Associated with the Oceanic Niño Index in the Colombian Coffee Zone. *J. Agric. Sci.* 8, 56. doi:10.5539/jas.v8n3p56
- Pineda, L.E., Willems, P., 2015. Multisite Downscaling of Seasonal Predictions to Daily Rainfall Characteristics over Pacific–Andean River Basins in Ecuador and Peru Using a Nonhomogeneous Hidden Markov Model. *J. Hydrometeorol.* 17, 481–498. doi:10.1175/JHM-D-15-0040.1
- Plackett, R.L., 1983. Karl Pearson and the Chi-Squared Test. *Int. Stat. Rev. Rev. Int. Stat.* 51, 59–72. doi:10.2307/1402731
- Portig, W.H., 1965. Central American Rainfall. *Geogr. Rev.* 55, 68–90. doi:10.2307/212856
- Poveda, G., Gil, M. M., Quiceno, N., 1998. ENSO y NAO en Colombia: El ciclo anual de la hidrología. *Bull. Institut Francais D'Études Andin.* 27, 721–731.

- Poveda, G., Mesa, Ó.J., 1996. Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Tecnol. Cienc. Agua* 11, 21–37.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, F., Barco, O., Correa, P., 2002. Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorol. Colomb.* 6, 121–130.
- Poveda, G., Waylen, P.R., Pulwarty, R.S., 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 234, 3–27. doi:10.1016/j.palaeo.2005.10.031
- Rad, A.M., Khalili, D., Kamgar-Haghighi, A.A., Zand-Parsa, S., Banimahd, S.A., 2016. Assessment of seasonal characteristics of streamflow droughts under semiarid conditions. *Nat. Hazards* 82, 1541–1564. doi:10.1007/s11069-016-2256-6
- Shepard, D., 1968. A Two-dimensional Interpolation Function for Irregularly-spaced Data, in: *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, ACM '68*. ACM, New York, NY, USA, pp. 517–524. doi:10.1145/800186.810616
- Smith Quintero, R.A., Vélez Upegui, J.I., Velásquez Henao, J.D., Ceballos López, A., Correa Velásquez, P.L., Góez Arango, C., Hernández Navarro, O.O., Salazar Velásquez, L.F., Zapata Gómez, E.C., Smith Quintero, R.A., Vélez Upegui, J.I., Velásquez Henao, J.D., Ceballos López, A., Correa Velásquez, P.L., Góez Arango, C., Hernández Navarro, O.O., Salazar Velásquez, L.F., Zapata Gómez, E.C., 2004. Modelos de predicción de caudales mensuales para el sector eléctrico colombiano. *Av. En Recur. Hidraul.* 91–102.
- Sonnadara, D.U.J., Jayewardene, D.R., 2015. A Markov chain probability model to describe wet and dry patterns of weather at Colombo. *Theor. Appl. Climatol.* 119, 333–340. doi:10.1007/s00704-014-1117-z
- Taewichit, C., Soni, P., Salokhe, V.M., Jayasuriya, H.P.W., 2013. Optimal stochastic multi-states first-order Markov chain parameters for synthesizing daily rainfall data using multi-objective differential evolution in Thailand. *Meteorol. Appl.* 20, 20–31. doi:10.1002/met.292
- Tobler, W.R., 1970. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Econ. Geogr.* 46, 234–240. doi:10.2307/143141
- Ward, J.H.J., 1963. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58, 236–244. doi:10.1080/01621459.1963.10500845
- Waylen, P.R., Quesada, M.E., Caviedes, C.N., 1996. Temporal and spatial variability of annual precipitation in Costa Rica and the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.* 16, 173–193.

- Wilks, D.S., 1998. Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *J. Hydrol.* 210, 178–191. doi:10.1016/S0022-1694(98)00186-3
- Wilks, D.S., 1989a. Conditioning stochastic daily precipitation models on total monthly precipitation. *Water Resour. Res.* 25, 1429–1439. doi:10.1029/WR025i006p01429
- Wilks, D.S., 1989b. Conditioning stochastic daily precipitation models on total monthly precipitation. *Water Resour. Res.* 25, 1429–1439. doi:10.1029/WR025i006p01429
- Yeh, C.-F., Wang, J., Yeh, H.-F., Lee, C.-H., 2015. SDI and Markov Chains for Regional Drought Characteristics. *Sustainability* 7, 10789–10808. doi:10.3390/su70810789
- Yengoh, G.T., Armah, F.A., Onumah, E.E., Odoi, J.O., 2010. Trends in Agriculturally-Relevant Rainfall Characteristics for Small-scale Agriculture in Northern Ghana. *J. Agric. Sci.* 2, 3. doi:10.5539/jas.v2n3p3