



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Índices agroclimáticos en la cuenca del río Chinchiná bajo efectos de variabilidad climática

David Felipe Rincón Castañeda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia
2017

Índices agroclimáticos en la cuenca del río Chinchiná bajo efectos de variabilidad climática

David Felipe Rincón Castañeda

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D., Jorge Julián Vélez Upegui

Codirectora:

M.Sc., Olga Lucía Ocampo López

Línea de Investigación:

Ingeniería hidráulica y ambiental

Grupo de Investigación:

Ingeniería hidráulica y ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2017

Agradecimientos

Deseo expresar mis agradecimientos a las instituciones que por sus valiosos aportes ayudaron en la elaboración de esta investigación:

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, la Central Hidroeléctrica de Caldas – CHEC, al Centro Nacional de Investigaciones de Café – CENICAFE y a la Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS por la información climática suministrada.

Al Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño – CIIFEN, Proyecto Cuencas Climáticamente Resilientes y Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional – USAID, por el apoyo económico, asesorías y acompañamiento continuo durante el desarrollo de la investigación.

Al proyecto “VACEA – Vulnerability and Adaptation to Climate Extremes in the Americas” ejecutado a través del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

A la universidad Nacional de Colombia y Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental por el apoyo otorgado.

A las personas que colaboraron en la realización de la investigación:

A mi director Jorge Julián Vélez Upegui y codirectora Olga Lucía Ocampo López por su acertada dirección, conocimiento aportado y valiosos consejos.

A mi madre y mi hermano que han sido un pilar muy importante en mi vida y su apoyo incondicional que me ha fortalecido cada día.

A Sthefania Grajales por su constante apoyo, acompañamiento y colaboración.

A mis compañeros, amigos y a todas las personas que de una u otra forma han hecho este trabajo posible, muchas gracias.

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo establecer el efecto de la variabilidad climática en la cuenca del río Chinchiná, mediante el análisis de las relaciones entre El Niño Oscilación del Sur - ENSO, variables como la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, el brillo solar, e índices agroclimáticos como el tiempo térmico, la amplitud térmica, el déficit de brillo solar, el índice de concentración de la precipitación, el índice estandarizado de precipitación, el índice de Fournier modificado y el índice de erosividad. La investigación se realizó utilizando la información de 23 estaciones climatológicas pertenecientes al IDEAM, CENICAFÉ y la CHEC. Se analizó la influencia de diferentes índices climáticos en el clima de la cuenca, donde el ONI, el MEI y el BEST, presentaron la mejor relación; las variables como la precipitación, la humedad relativa y el brillo solar tienen una relación directa con estos índices, mientras que la temperatura expuso un mejor comportamiento cuando se realizó un rezago de un mes. Los diferentes índices agroclimáticos y las variables analizadas presentaron afectación por cada fase del ENSO y una tendencia asociada con la altitud. Los resultados permitieron clasificar la erosividad a causa de la lluvia como moderada, alta y muy alta, y la distribución de la precipitación como uniforme y moderadamente estacional. El análisis ayuda a comprender la influencia de la variabilidad climática en la región y sus impactos en la producción de cultivos como el café y el plátano.

Palabras clave: Índices climáticos, índices agroclimáticos, variabilidad climática, ENSO, cuenca del río Chinchiná.

Agroclimatic indices in the Chinchiná river basin under the effects of climatic variability

Abstract

This research aims to establish the effect of climate variability in the Chinchiná river basin, by analyzing the relationships between El Niño Southern Oscillation - ENSO, variables such as precipitation, temperature, relative humidity, solar brightness, and agroclimatic indices such as thermal time, thermal amplitude, precipitation concentration index, standardized precipitation index, modified Fournier index and erosivity index. The research was carried out using information from 23 climatological stations belonging to IDEAM, CENICAFÉ and CHEC. The influence of different climate indices on the weather of the basin was analyzed, the ONI, the MEI and the BEST, presented the best relation; variables such as precipitation, relative humidity and solar brightness presented better relation to the climate indices directly while the temperature showed a better behavior when a delay of one month was realized. The different agroclimatic indices and the analyzed variables showed affectation in each phase of the ENSO and a trend associated with the altitude was presented. The results allowed to classify the erosivity due to rainfall as moderate, high and very high; and the distribution of the precipitation as uniform and moderately seasonal. This analysis helps to understand the influence of climate variability in the region and its impacts on the production of crops such as coffee and banana.

Keywords: climate indices, agroclimatic indices, climate variability, ENSO, Chinchiná river basin.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Abstract	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XXI
Introducción	1
1. Objetivos	5
1.1 Objetivo general	5
1.2 Objetivos específicos	5
2. Antecedentes y estado del arte	7
2.1 Clima.....	12
2.2 Variabilidad climática.....	13
2.2.1 El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés).....	14
2.2.2 El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en Colombia	15
2.2.3 Índices climáticos.....	16
2.2.3.1 El Índice Oceánico de El Niño (ONI por sus siglas en inglés)	17
2.2.3.2 Anomalía de la Temperatura Superficial del Mar en las regiones El Niño 1+2, 3 y 4	18
2.2.3.3 Índice Multivariado del ENSO (MEI por sus siglas en inglés).....	19
2.2.3.4 Índice de la Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés).....	20
2.2.3.5 Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés)	21
2.2.3.6 Patrón del Pacífico y América del Norte (PNA por sus siglas en inglés)	21
2.2.3.7 Índice del Pacífico Oeste (WP por sus siglas en inglés)	22
2.2.3.8 Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés)	23
2.2.3.9 Índice Bivariado del ENSO - BEST	24
2.2.3.10 Índice del Atlántico Norte Tropical (TNA por sus siglas en inglés)	24
2.2.3.11 Índice del Atlántico Sur Tropical (TSA por sus siglas en inglés).....	24
2.2.3.12 Índice Trans-Niño (TNI por sus siglas en inglés).....	25
2.2.3.13 Alberca Cálida Occidental (WHWP por sus siglas en inglés)	26
2.2.3.14 Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés).....	27
2.3 Agroclimatología	28
2.4 Índices agroclimáticos	29
2.4.1 Tiempo térmico - TT	29

2.4.2	Amplitud térmica - AT	29
2.4.3	Índice de déficit de brillo solar - DBS	29
2.4.4	Índice de concentración de la precipitación - ICP	30
2.4.5	Índice de Fournier modificado – IFM	30
2.4.6	Índice de erosividad - IE	31
2.4.7	Índice estandarizado de precipitación (SPI por sus siglas en inglés)	32
3.	Metodología.....	33
3.1	Zona de estudio	35
3.1.1	Localización	35
3.1.2	Geomorfología en la cuenca del río Chinchiná	36
3.1.3	Clima en la cuenca del río Chinchiná	38
3.2	Recopilación y procesamiento de la información	39
	Análisis estadístico de la información.....	41
3.3	Estimación de los índices agroclimáticos	42
3.3.1	Tiempo térmico.....	42
3.3.2	Amplitud térmica.....	42
3.3.3	Índice de déficit de brillo solar	42
3.3.4	Índice de concentración de la precipitación	42
3.3.5	Índice de Fournier modificado	43
3.3.6	Índice de erosividad	43
3.3.7	Índice estandarizado de precipitación.....	44
3.4	Estimación de las correlaciones.....	45
	Coefficientes de correlación.....	45
3.5	Análisis temporal.....	46
3.6	Análisis espacial de las variables.....	46
3.7	Análisis con el ENSO.....	46
3.8	Impactos de la variabilidad climática en la producción de los principales cultivos	47
4.	Resultados y discusión	51
4.1	Análisis estadístico de la información.....	51
4.2	Estimación de los índices agroclimáticos	55
4.2.1	Tiempo térmico.....	55
4.2.2	Amplitud térmica.....	57
4.2.3	Déficit de brillo solar	60
4.2.4	Índice de concentración de la precipitación	63
4.2.5	Índice de Fournier Modificado	64
4.2.6	Índice de erosividad	65
4.2.7	Índice estandarizado de precipitación.....	67
4.3	Estimación de las correlaciones.....	69
4.3.1	Correlaciones con la precipitación	69
4.3.2	Correlaciones con la temperatura.....	76
4.3.3	Correlaciones con la humedad relativa.....	80
4.3.4	Correlaciones con el brillo solar.....	83
4.3.5	Correlaciones con el tiempo térmico.....	86
4.3.6	Correlaciones con la amplitud térmica.....	90
4.3.7	Correlaciones con el déficit de brillo solar.....	93
4.3.8	Correlaciones con el índice estandarizado de precipitación	96
4.4	Análisis con el ENSO.....	100

4.4.1	Relación de la precipitación con el ENSO	100
4.4.2	Relación de la temperatura con el ENSO.....	102
4.4.3	Relación de la humedad relativa con el ENSO	104
4.4.4	Relación del brillo solar con el ENSO	106
4.4.5	Relación del tiempo térmico con el ENSO	108
4.4.6	Relación de la amplitud térmica con el ENSO.....	110
4.4.7	Relación del déficit de brillo solar con el ENSO	112
4.4.8	Relación del índice de concentración de la precipitación con el ENSO	114
4.4.9	Relación del índice de Fournier modificado con el ENSO	116
4.4.10	Relación del índice de erosividad con el ENSO	118
4.4.11	Relación del índice estandarizado de precipitación con el ENSO	119
4.5	Impactos en la producción.....	128
4.5.1	Café a nivel nacional	128
4.5.2	Café en la cuenca del río Chinchiná	131
4.5.3	Plátano a nivel nacional	133
4.5.4	Plátano en la cuenca del río Chinchiná	134
5.	Conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación	137
5.1	Conclusiones.....	137
5.2	Recomendaciones.....	140
5.3	Futuras líneas de investigación	140
6.	Bibliografía	141

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Algunos factores que afectan la variabilidad climática.	14
Figura 2-2: Regiones del ENSO.	18
Figura 2-3: Anomalías TSM en cada región del ENSO.	19
Figura 2-4: Variables oceánico-atmosféricas.	19
Figura 2-5: Fases del PNA, positiva (derecha) y negativa (izquierda).	22
Figura 2-6: Condiciones típicas en el océano Pacífico durante las fases del PDO.	23
Figura 2-7: Comportamiento del índice TSA.	25
Figura 2-8: Regresión de anomalías globales de TSM con TNI (1900 – 1976).	25
Figura 2-9: Ciclo anual del WHWP.	27
Figura 2-10: Elementos agroclimáticos determinantes en la producción vegetal.	28
Figura 3-1: Descripción metodológica.	34
Figura 3-2: Localización de la cuenca del río Chinchiná.	35
Figura 3-3: Diferentes tipos de suelos y coberturas agrícolas en la cuenca del río Chinchiná.	36
Figura 3-4: Localización de las estaciones en la cuenca del río Chinchiná.	41
Figura 3-5: Principales cultivos por área sembrada en el año 2016 en los municipios pertenecientes a la cuenca del río Chinchiná.	47
Figura 3-6: Factores que inciden en la producción del café.	48
Figura 3-7: Fases de crecimiento del café.	49
Figura 3-8: Fases de crecimiento en plátano <i>Dominico Hartón</i>	50
Figura 4-1: Diagramas de caja de la temperatura, la humedad relativa y el brillo solar.	54
Figura 4-2: Diagramas de caja de precipitación.	55
Figura 4-3: Tiempo térmico promedio mensual (1981 - 2010).	56
Figura 4-4: Tiempo térmico promedio diario por trimestres (1981 - 2010).	56
Figura 4-5: Tiempo térmico promedio diario (1981 – 2010).	57
Figura 4-6: Amplitud térmica promedio mensual (1981 - 2010).	58
Figura 4-7: Amplitud térmica promedio trimestral (1981 - 2010).	59
Figura 4-8: Amplitud térmica promedio diario (1981 - 2010).	60
Figura 4-9: Déficit de brillo solar acumulado mensual (1981 - 2010).	61
Figura 4-10: Déficit de brillo solar promedio diario por trimestres (1981 - 2010).	62
Figura 4-11: Déficit de brillo solar promedio diario (1981 - 2010).	63
Figura 4-12: Índice de concentración de la precipitación (1981 - 2010).	63
Figura 4-13: Índice de concentración de la precipitación promedio anual (1981 - 2010).	64
Figura 4-14: Índice de Fournier modificado (1981 - 2010).	65
Figura 4-15: Índice de Fournier modificado promedio anual (1981 - 2010).	65

Figura 4-16: Índice de erosividad (1981 - 2010).....	66
Figura 4-17: Índice de erosividad promedio anual (1981 - 2010).....	66
Figura 4-18: SPI (1 mes), estación Cenicafe (1981 - 2010).....	67
Figura 4-19: SPI (3 meses), estación Cenicafe (1981 - 2010).....	67
Figura 4-20: SPI (6 meses), estación Cenicafe (1981 - 2010).....	68
Figura 4-21: SPI (12 meses), estación Cenicafe (1981 - 2010).....	68
Figura 4-22: SPI (24 meses), estación Cenicafe (1981 - 2010).....	68
Figura 4-23: Comparación entre la precipitación y el índice ONI en la estación Cenicafe (1981 - 2010).	74
Figura 4-24: Comparación entre la precipitación y el índice MEI en la estación Cenicafe (1981 - 2010).	74
Figura 4-25: Comparación entre la precipitación y el índice BEST en la estación Cenicafe (1981 - 2010).	75
Figura 4-26: Correlaciones entre la precipitación, el índice ONI (A), MEI (B) y BEST (C) promediando la variable cada 3 meses.	76
Figura 4-27: Comparación entre la temperatura media y el índice ONI en la estación Cenicafe con rezago de 1 mes (1981 - 2010).	78
Figura 4-28: Comparación entre la temperatura y el índice Niño 3 en la estación Cenicafe con rezago de 1 mes (1981 - 2010).	78
Figura 4-29: Comparación entre la temperatura y el índice Niño 3,4 en la estación Cenicafe con rezago de 1 mes (1981 - 2010).	79
Figura 4-30: Correlaciones entre la temperatura promediada cada 3 meses, el índice ONI (A), Niño 3 (B) y Niño 3,4 (C), con rezago de 1 mes.	80
Figura 4-31: Comparación entre la humedad relativa y el índice ONI en la estación Cenicafe (1981 - 2010).	82
Figura 4-32: Comparación entre la humedad relativa y el índice BEST en la estación Cenicafe (1981 - 2010).	82
Figura 4-33: Correlaciones entre la humedad relativa promediada cada 3 meses, el índice ONI (A) y BEST (B).....	83
Figura 4-34: Comparación entre el brillo solar y el índice ONI en la estación Cenicafe (1981 - 2010).	85
Figura 4-35: Comparación entre el brillo solar y el índice BEST en la estación Cenicafe (1981 - 2010).	85
Figura 4-36: Correlaciones entre el brillo solar promediado cada 3 meses, el índice ONI (A) y BEST (B).	86
Figura 4-37: Comparación entre el tiempo térmico y el índice ONI en la estación Cenicafe con rezago de 1 mes (1981 - 2010).	88
Figura 4-38: Comparación entre el tiempo térmico y el índice Niño 3 en la estación Cenicafe con rezago de 1 mes (1981 - 2010).	89
Figura 4-39: Comparación entre el tiempo térmico y el índice Niño 3,4 en la estación Cenicafe con rezago de 1 mes (1981 - 2010).	89
Figura 4-40: Correlaciones entre el tiempo térmico promediado cada 3 meses, el índice ONI (A), Niño 3 (B) y Niño 3,4 (C) con rezago de 1 mes.	90

Figura 4-41: Comparación entre la amplitud térmica y el índice ONI en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).....	92
Figura 4-42: Comparación entre la amplitud térmica y el índice BEST en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).....	92
Figura 4-43: Correlaciones entre la amplitud térmica promediada cada 3 meses, el índice ONI (A) y el BEST (B), con rezago de 1 mes.....	93
Figura 4-44: Comparación entre el déficit de brillo solar y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).....	95
Figura 4-45: Comparación entre el déficit de brillo solar y el índice BEST en la estación Cenicafé (1981 - 2010).....	95
Figura 4-46: Correlaciones entre el déficit de brillo solar promediado cada 3 meses y el índice ONI (A) y BEST (B).....	96
Figura 4-47: Comparación entre el SPI 6 meses y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).....	97
Figura 4-48: Comparación entre el SPI 6 meses y el índice MEI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).....	98
Figura 4-49: Comparación entre el SPI 12 meses y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).....	98
Figura 4-50: Comparación entre el SPI 12 meses y el índice MEI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).....	99
Figura 4-51: Correlaciones entre el SPI 6 meses, el índice ONI (A) y el MEI (B).....	99
Figura 4-52: Correlaciones entre el SPI 12 meses, el índice ONI (A) y el MEI (B).....	100
Figura 4-53: Efectos del ENSO en la precipitación, estación Granja Luker (1981 - 2010).	101
Figura 4-54: Precipitación promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).....	101
Figura 4-55: Efectos del ENSO en la temperatura media, estación Naranjal (1981 - 2010).	102
Figura 4-56: Efectos del ENSO en la temperatura media, estación Cenicafé (1981 - 2010).	103
Figura 4-57: Temperatura promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).....	103
Figura 4-58: Efectos del ENSO en la humedad relativa, estación Cenicafé (1981 - 2010).	104
Figura 4-59: Efectos del ENSO en la humedad relativa, estación Agronomía (1981 - 2010).	105
Figura 4-60: Humedad relativa promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	105
Figura 4-61: Efectos del ENSO en el brillo solar, estación Granja Luker (1981 - 2010).	106
Figura 4-62: Efectos del ENSO en el brillo solar, estación Santágueda (1981 - 2010)..	107
Figura 4-63: Brillo solar promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).....	107
Figura 4-64: Efectos del ENSO en el tiempo térmico, estación Granja Luker (1981 - 2010).	108
Figura 4-65: Efectos del ENSO en el tiempo térmico, estación Naranjal (1981 - 2010).	109
Figura 4-66: Tiempo térmico promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).....	109

Figura 4-67: Efectos del ENSO en la amplitud térmica, estación Granja Luker (1981 - 2010).	111
Figura 4-68: Efectos del ENSO en la amplitud térmica, estación Santágueda (1981 - 2010).	111
Figura 4-69: Amplitud térmica promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	112
Figura 4-70: Efectos del ENSO en el déficit de brillo solar, estación Naranjal (1981 - 2010).	113
Figura 4-71: Efectos del ENSO en el déficit de brillo solar, estación Santágueda (1981 - 2010).	113
Figura 4-72: Déficit de brillo solar promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	114
Figura 4-73: Efectos del ENSO en el índice de concentración de la precipitación.	115
Figura 4-74: ICP promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	116
Figura 4-75: Efectos del ENSO en el índice de Fournier modificado.	117
Figura 4-76: IFM promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	117
Figura 4-77: Efectos del ENSO en el índice de erosividad.	118
Figura 4-78: Índice de erosividad promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	119
Figura 4-79: Efectos del ENSO en el SPI (1 mes), estación Cenicafé (1981 - 2010).	120
Figura 4-80: SPI 1 mes promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	121
Figura 4-81: Efectos del ENSO en el SPI (3 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).	122
Figura 4-82: SPI 3 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	122
Figura 4-83: Efectos del ENSO en el SPI (6 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).	123
Figura 4-84: SPI 6 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	124
Figura 4-85: Efectos del ENSO en el SPI (12 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).	125
Figura 4-86: SPI 12 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	125
Figura 4-87: Efectos del ENSO en el SPI (24 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).	126
Figura 4-88: SPI 24 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).	127
Figura 4-89: Producción histórica de café 1956 – 2016 comparada con el índice ONI.	128
Figura 4-90: Producción histórica anual de café 1956 – 2016 comparada con el promedio anual del índice ONI.	128
Figura 4-91: Producción histórica de café y fase de desarrollo del cultivo con el ENSO.	129
Figura 4-92: Producción histórica de café y fase de desarrollo del cultivo con el ENSO, rezago de 6 meses.	129
Figura 4-93: Producción anual histórica de café en cada fase del ENSO.	130
Figura 4-94: Producción anual histórica de café en cada fase el ENSO con rezago de 1 año.	130
Figura 4-95: Producción anual de café en la cuenca del río Chinchiná comparada con el promedio anual del índice ONI (2007 – 2016).	131
Figura 4-96: Producción anual de café en la cuenca del río Chinchiná en cada fase del ENSO.	131

Figura 4-97: Producción anual de café en la cuenca del río Chinchiná en cada fase el ENSO con rezago de 1 año.....	132
Figura 4-98: Producción de plátano y el efecto del ENSO.	133
Figura 4-99: Producción de plátano y el efecto del ENSO con rezago de 1 año.	133
Figura 4-100: Producción anual de plátano en la cuenca del río Chinchiná comparada con el promedio anual del índice ONI (2007 – 2016).....	134
Figura 4-101: Producción anual de plátano en la cuenca del río Chinchiná en cada fase del ENSO (2007 - 2016).	134
Figura 4-102: Producción anual de plátano en la cuenca del río Chinchiná en cada fase del ENSO con rezago de 1 año (2007 – 2016).....	135

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Índices climáticos.....	16
Tabla 2-2: Clasificación del índice de concentración de la precipitación.	30
Tabla 2-3: Clasificación del índice de Fournier modificado.....	31
Tabla 3-1: Parámetros fisiográficos y morfométricos de la cuenca del río Chinchiná y principales subcuencas.	37
Tabla 3-2: Estaciones evaluadas para el estudio en la cuenca del río Chinchiná.....	40
Tabla 3-3: Clasificación del índice de concentración de la precipitación.	43
Tabla 3-4: Clasificación del índice de Fournier modificado.....	43
Tabla 3-5: Clasificación del índice de erosividad.....	44
Tabla 3-6: Estadísticos de las estaciones seleccionadas.	44
Tabla 3-7: Escala de interpretación del coeficiente de correlación.	45
Tabla 4-1: Estadísticos de las estaciones seleccionadas para la temperatura, la humedad relativa y el brillo solar.	52
Tabla 4-2: Estadísticos para la precipitación en cada estación.	53
Tabla 4-3: Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov.	69
Tabla 4-4: Correlaciones entre la precipitación y los índices climáticos.	70
Tabla 4-5: Correlaciones entre la precipitación promediada y el índice ONI.	72
Tabla 4-6: Correlaciones entre la precipitación promediada cada 3 meses y el índice ONI con rezagos de 0, 1, 2 y 3 meses, R0, R1, R2 y R3, respectivamente.	73
Tabla 4-7: Correlaciones entre la temperatura media y los índices climáticos.....	76
Tabla 4-8: Correlaciones entre la temperatura promediada cada 3 meses y los índices climáticos con rezago de 1 mes.	77
Tabla 4-9: Correlaciones entre la humedad relativa y los índices climáticos.	80
Tabla 4-10: Correlaciones entre la humedad relativa promediada cada 3 meses y los índices climáticos.	81
Tabla 4-11: Correlaciones entre el brillo solar y los índices climáticos.	83
Tabla 4-12: Correlaciones entre el brillo solar promediado cada 3 meses y los índices climáticos.	84
Tabla 4-13: Correlaciones entre el tiempo térmico y los índices climáticos.	87
Tabla 4-14: Correlaciones entre el tiempo térmico promediado cada 3 meses y los índices climáticos con rezago de 1 mes.	87
Tabla 4-15: Correlaciones entre la amplitud térmica y los índices climáticos.	90
Tabla 4-16: Correlaciones entre la amplitud térmica promediada cada 3 meses y los índices climáticos con rezago de 1 mes.	91

Tabla 4-17: Correlaciones entre el déficit de brillo solar y los índices climáticos.....	93
Tabla 4-18: Correlaciones entre el déficit de brillo solar promediado cada 3 meses y los índices climáticos.....	94
Tabla 4-19: Correlaciones entre el SPI en la estación Cenicafé para diferentes periodos y los índices climáticos.	96
Tabla 4-20: TT acumulado promedio por trimestres en cada fase del ENSO (1981-2010).	133

Introducción

Las plantas intervienen en los ciclos del agua y del carbono (Hutjes et al., 1998; Prentice et al., 2000), su tasa y dinámica de crecimiento se ven afectadas por las variables agroclimáticas, las cuales facilitan el estudio de los efectos de la variabilidad climática que influyen en el normal desarrollo de los cultivos. Por tanto, se requiere el análisis integrado de las interacciones ambientales que permitan identificar patrones espaciales y temporales en las dinámicas de cambio global (Seneviratne et al., 2006; Frank et al., 2010; Ocampo, 2013), permitiendo así comprender la forma en que los eventos hidroclimáticos impactan la agricultura.

Por efecto de una mayor cantidad de energía y humedad en el sistema climático (Trenberth et al., 2007; Willett et al., 2008), se espera un incremento en la variabilidad climática a causa del calentamiento global (IPCC, 2012). Hecho evidente porque no sólo se presentan incrementos en la temperatura media del aire, sino también en los extremos (Zhang et al., 2008; IPCC, 2001, 2007, 2012). Este aumento en las temperaturas, modifica el ciclo hidrológico y contribuye a una mayor evaporación y a precipitaciones más intensas (Dai, 2006). Como resultado de esto, hay una mayor probabilidad de incremento en la magnitud y frecuencia de los eventos climáticos extremos (CMNUCC, 2007; OMM, 2013a; IPCC, 2007, 2012), definidos por valores inusualmente altos o bajos en el rango de observaciones (IPCC, 2012). Estos eventos son una de las principales manifestaciones del cambio climático en muchas regiones del mundo, y en especial en países tropicales como Colombia, donde la influencia de procesos que ocurren en los océanos Atlántico y Pacífico afectan el clima (Poveda 2004; Poveda et al. 2007, 2011). Por estas alteraciones, las inundaciones y sequías han afectado los diferentes sectores económicos, con mayores impactos en la agricultura. Se evidencia preocupación por las tendencias de estos eventos (Roy et al., 2013); particularmente por los aumentos generalizados en la precipitación (Alexander et al. 2006), que amenazan las cuencas hidrográficas, los servicios ecosistémicos que prestan y las actividades productivas (Rosenzweig et al., 2004; Lin, 2007; Ocampo, 2013). Es necesario, por tanto, comprender con mayor profundidad cómo los eventos hidrometeorológicos e hidroclimáticos se están presentando en las cuencas hidrográficas y cómo impactan los sectores productivos como la agricultura, para así dirigir las acciones hacia la adaptación al cambio climático y a la variabilidad climática en el sector agrícola.

En Colombia, al encontrarse en la zona tropical, la mayoría de los cultivos no están dotados de irrigación, ya que la precipitación es muy diversa, con amplia variabilidad espacial y temporal (Pabón et al., 2001), y los niveles son suficientes en la mayoría de las regiones

para el correcto desarrollo de las plantas. Por consiguiente, la variabilidad climática juega un rol importante en la productividad (Slingo et al., 2005), amenazándola, en especial, la agricultura familiar y campesina que están compuestas por pequeños agricultores rurales que son más vulnerables (Verdin et al., 2005; Lin, 2007; Ocampo, 2013).

Según IDEAM (2010), los reportes de la Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres (DGPAD) entre los años 1950 y 2007 indican un incremento del 216% de los desastres asociados con sequía, durante los periodos El Niño; mientras que durante los años La Niña, los desastres relacionados con lluvia, como deslizamientos, avenidas torrenciales e inundaciones, se incrementaron en un 16,1%.

La producción agrícola depende del ciclo del agua, en especial de la distribución temporal y espacial de las precipitaciones y de la disponibilidad de agua. Esta relación es muy importante ya que un ciclo hidrológico modificado por un fenómeno de variabilidad climática, es un desafío para la agricultura porque tanto el déficit como el exceso de agua, impactan la producción del sector (Ocampo, 2011).

El análisis de los impactos económicos del cambio climático para Colombia, utilizando el Modelo de Equilibrio General Computable (DNP, 2012), permite identificar que la agricultura es un sector que se impacta directamente por los cambios de las variables climáticas. Aunque históricamente, la agricultura colombiana ha podido adaptarse a la variabilidad climática, los fenómenos pueden ser cada vez más fuertes y representan una gran amenaza (Banco de la Republica, 2007).

En el sector cafetero, las alteraciones climáticas asociadas con el fenómeno de La Niña afectaron considerablemente la ocurrencia de las floraciones; en consecuencia, la producción de café bajó significativamente; para los años 2011 y 2012, solo alcanzaron 7.8 y 7.7 millones de sacos, respectivamente (FNC, 2011, 2012a).

En el Departamento de Caldas, las actividades agropecuarias representan el 11.6% de su producto interno bruto - PIB (Ministerio de Comercio Industria y Turismo, 2017). Por efectos de la ola invernal, en los años 2011 y 2012, se afectó la producción agrícola y se invirtieron recursos por \$1.934 millones para el apoyo a pequeños productores (FNC, 2012b).

La cuenca del río Chinchiná localizada en la región Centro Sur del Departamento de Caldas concentra el 55% de la población y el 80% de la producción industrial del departamento (Ocampo et al., 2014). Los territorios agrícolas representan el 63.8% de la superficie de la cuenca, que comprende un área total de 1052,25 km² (CORPOCALDAS et al., 2015). En la zona urbana, las actividades asociadas con los sectores secundario y terciario son fundamentales. En la zona rural, se desarrollan las actividades agropecuarias o primarias, y dado que en la cuenca se presentan todos los pisos térmicos, hay gran variedad de cultivos. En la cuenca alta, la siembra de papa es la principal actividad económica y se acompaña de ganadería extensiva de doble propósito y de la crianza de toros de casta. En la cuenca media la principal actividad económica es la caficultura, seguida por el cultivo del plátano, tomate y aguacate tipo Hass. En la cuenca baja se destacan los cultivos de

cítricos y guayabas, acompañados con ganadería extensiva (CORPOCALDAS et al., 2015).

Esta cuenca ha sido objeto de análisis tanto a nivel nacional, como internacional por sus características complejas; fue cuenca piloto en el proceso de ordenamiento de Cuencas hidrográficas en Colombia y se han desarrollado diferentes estudios internacionales para comprender la vulnerabilidad como son el VACEA (Vulnerabilidad y Adaptación a los Climats Extremos en las Américas) y PARA-AGUA. Sin embargo, se requieren acciones concretas para incrementar la resiliencia y favorecer la adaptación; en especial en la agricultura. Estas acciones parten del conocimiento de los impactos de los eventos hidrometeorológicos e hidroclimáticos en los principales cultivos.

Esta investigación tiene como objetivo establecer el efecto de la variabilidad climática en la cuenca del río Chinchiná, mediante el análisis de las relaciones entre El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), variables como la precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar, e índices agroclimáticos como el tiempo térmico, la amplitud térmica, el déficit de brillo solar, el índice de concentración de la precipitación, el índice estandarizado de precipitación, el índice de Fournier modificado y el índice de erosividad.

Esta tesis de maestría se encuentra enmarcada dentro del proyecto “Cuencas climáticamente resilientes” ejecutado por el Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño – CIIFEN, designado como el Centro Regional del Clima para el este de Sudamérica y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional – USAID, que en convenio con la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, buscan aliados interinstitucionales para fortalecer el conocimiento base e integrarlo a la toma de decisiones y definición de estrategias para la adaptación y resiliencia frente al cambio y a la variabilidad climática.

A continuación, se presentan los objetivos de la investigación. En el capítulo 2 se hace una exposición sobre los antecedentes y el estado del arte, en el cual se da a conocer el referente teórico de cada componente necesario dentro de la investigación, se presentan descripciones sobre el clima, la variabilidad climática, los índices climáticos y agroclimáticos. Luego se realiza una descripción de la metodología utilizada y finalmente se presentan los resultados obtenidos.

1.Objetivos

1.1 Objetivo general

Establecer el efecto de variabilidad climática en la dinámica de las variables agroclimáticas para la cuenca del río Chinchiná y los impactos en los principales cultivos.

1.2 Objetivos específicos

Evaluar los índices agroclimáticos para los principales cultivos de la cuenca del río Chinchiná.

Determinar los patrones espaciales y temporales de los índices agroclimáticos identificados.

Establecer las relaciones entre los indicadores de variabilidad climática y los índices agroclimáticos.

Evaluar los impactos de la variabilidad climática en la producción de los cultivos seleccionados.

2. Antecedentes y estado del arte

Hay preocupación a nivel internacional por los impactos de la variabilidad climática y el cambio climático en las cosechas (Porter et al., 2005; Slingo et al., 2005; Ocampo, 2013), estos factores pueden incidir dramáticamente en la producción agropecuaria (OMM, 2004). Los impactos en la agricultura pueden variar entre regiones, dependiendo de la localización, del clima, las condiciones ambientales locales, las respuestas en el ámbito socioeconómico y de factores institucionales (IPCC, 2007) y las medidas de adaptación; aspectos fundamentales para la resiliencia.

El ENSO en sus dos fases El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), presentan grandes efectos en la variabilidad climática provocando una alteración en los eventos climáticos como sequías e inundaciones (IDEAM 2014; IPCC, 2013), que pueden afectar sectores como la agricultura, las poblaciones, los ecosistemas (Fallas et al., 2007), y sectores con menor capacidad de adaptación, resiliencia y recursos (PNUD, 2000; OMM, 2011). En diferentes ocasiones se han estudiado los efectos que ocasionan fenómenos como el ENSO, para lo cual se han realizado investigaciones que facilitan reconocer los posibles impactos y cómo adaptarse a diferentes escenarios de variabilidad climática.

Brown et al., (1997) simulan la producción de los cultivos con el modelo EPIC también conocido como Erosion Productivity Impact Calculator, en la parte centro-occidental de Estados Unidos ante diferentes escenarios climáticos. Los impactos se simularon con variaciones en la precipitación, temperatura, radiación solar, humedad y concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Se observó cómo cada variable afecta la respuesta de los cultivos y se ve necesario tener en cuenta todas las variables climáticas en futuros estudios de impactos asociados con el clima y no solamente la temperatura y la precipitación.

Lansigan et al., (2000) discuten los impactos de la variabilidad climática sobre la producción de los cultivos de arroz en Filipinas, encontrando que las variables climáticas con mayor afectación en el crecimiento del cultivo son la temperatura, la precipitación y la velocidad del viento. Concluyendo que el grado de vulnerabilidad del cultivo ante un evento de variabilidad climática depende significativamente de la fase de desarrollo en la cual se encuentre.

Hansen et al., (2001) analizan los impactos del ENSO en la producción de los cultivos en la zona sureste de Estados Unidos mediante análisis de varianza (ANOVA), encontrando que los eventos más fuertes de El Niño afectan de una forma diferente los cultivos con respecto a los eventos moderados y débiles.

Conde et al., (2006) estudian las diferentes medidas de adaptación ante la variabilidad climática asociada con eventos climáticos extremos como el ENSO, especialmente en cultivos de maíz en México, mediante simulaciones de los cultivos con el modelo Ceres-Maize para determinar su sensibilidad ante diferentes condiciones climáticas en escenarios futuros. Concluyendo que estrategias como optimizar el consumo de agua, utilizar invernaderos y el uso de abono pueden incrementar la diversidad de los cultivos y disminuir los riesgos climáticos.

Benning et al., (2011) estudian la variabilidad climática en Sur Dakota para los campos de maíz, están continuamente recibiendo información e identificando los cambios en temperatura, precipitación y evaluando sus impactos aplicando modelos con escenarios de variabilidad climática.

Donner et al., (2003) utilizan los modelos IBIS e HYDRA para investigar los efectos de la variabilidad climática en los cultivos de la cuenca del río Mississippi entre los años 1974 – 1994, encontrando que la resolución de los datos y del modelo limita la simulación de impactos locales del clima.

Mehta et al., (2012) hacen uso del modelo EPIC para simular el comportamiento de cultivos como maíz y trigo en respuesta a anomalías hidro-meteorológicas asociadas con la variabilidad climática en la cuenca del río Missouri en Estados Unidos, hallando que los impactos son diferentes dependiendo en qué zona de la cuenca se encuentren.

Mirzabaev (2013) evalúa el impacto de la variabilidad climática en los ingresos de la agricultura en Asia central mediante un modelo empírico que involucra las ganancias por hectárea y diferentes variaciones en el clima. Identificando que en los últimos 20 años los efectos del clima no han presentado muchos impactos sobre la producción de los cultivos en parte debido a las correctas acciones de los agricultores y al uso de tecnología que incrementa la capacidad de adaptación a los cambios climáticos.

Bezabih et al., (2014) analizan los impactos de la variabilidad y el cambio climático en la agricultura de Etiopía. Demostrando que los efectos de los cambios en la temperatura no son lineales y sus impactos varían drásticamente dependiendo la etapa de desarrollo en la que se encuentre el cultivo. También afirman que la precipitación en general presenta un rol menos importante comparada con la temperatura.

Lavado et al., (2014) estudian los impactos del ENSO en las precipitaciones del Perú, utilizando datos mensuales de 155 estaciones. También analizan los principales modos de variabilidad interanual de las precipitaciones usando la técnica de funciones ortogonales empíricas.

Velasco et al., (2015) realizaron una investigación de los impactos de la precipitación y la temperatura en la agricultura en México, demostrando que es importante entender la variabilidad climática para poder optimizar los cultivos, su producción y adaptación al comportamiento del clima.

Knox et al., (2014) exponen diferentes impactos en la agricultura producidos por el ENSO, distinguiendo entre los efectos los años El Niño y los años La Niña, los que definen cambios

en la producción buenos y malos para diferentes cultivos al mismo tiempo, y en algunos casos el aumento de plagas.

Yoo et al., (2013) analizan la influencia de la variabilidad climática sobre las variaciones de temperatura y viento en el planeta, mediante correlaciones con indicadores como el AO (Arctic Oscillation), Niño3,4 (ENSO) y QBO (Quasi-Biennial Oscillation).

Zhao et al., (2005) presentan diferentes impactos debido a la variabilidad climática actual y futura para la agricultura en zonas tropicales. En general exhiben que, debido a que la mayoría de países ubicados en los trópicos están en desarrollo, la poca inversión en la agricultura, junto con la deforestación, degradación del suelo y desastres recurrentes, generan un ambiente muy sensible ante los cambios en el clima.

Berlato et al., (2001) describen los impactos de El Niño y La Niña en la producción agrícola en el sur de Brasil, indicando que un adecuado pronóstico de las variaciones estacionales del clima provee una gran ayuda para el manejo de los cultivos. Se ve claramente como los diferentes episodios de El Niño y la Niña generan diferentes impactos en distintos cultivos y su importancia para prever un adecuado manejo en los ciclos de cada cultivo.

Kandji et al., (2007) presentan los impactos y adaptación frente a la variabilidad y cambio climático en la agricultura en el este de África, en donde, el poco uso de tecnología, fertilizantes e irrigación, generan un sector vulnerable ante los cambios dinámicos del clima. Encuentran necesario producir un desarrollo de tecnología y una agricultura flexible debido a la alta incertidumbre y a la dificultad de conocer los escenarios de clima futuros.

El análisis compuesto según el índice ONI, para la temperatura media trimestral de Colombia, realizado por Arango et al., (2014a) del grupo de modelamiento de tiempo, clima y escenarios de cambio climático bajo la subdirección de meteorología del IDEAM, evidencia que bajo condiciones El Niño, la temperatura media se ve fuertemente afectada, presentando altas probabilidades de incremento en los trimestres (Enero-Febrero-Marzo, Febrero-Marzo-Abril, Marzo-Abril-Marzo y Diciembre-Enero-Febrero), hasta un 90% para las regiones Andina y Pacífica, y 70% para la Orinoquía, la Amazonía y la zona norte de la región Caribe. Por el contrario, bajo condiciones La Niña, la tendencia general es una disminución de la temperatura media, en promedio 1°C con probabilidades entre 60% y 70%, con mayor relevancia en las regiones Pacífico y Andina, hacia los últimos trimestres del año (Octubre-Noviembre-Diciembre, Noviembre-Diciembre-Enero y Diciembre-Enero-Febrero).

Ramírez et al., (2009) estimaron la relación entre la lluvia mensual en los Andes colombianos y las anomalías de las temperaturas superficiales del océano pacífico (PSST) en la región El Niño 3,4, medida en el Índice Oceánico de El Niño. Este análisis muestra una relación lineal estadísticamente significativa, la lluvia de la región bajo la presencia del ENSO en su fase La Niña, manifiesta incrementos con respecto a los valores históricos, en especial para los casos de los meses en donde se registra la menor cantidad de lluvia en el año como diciembre, enero, febrero, junio, julio y agosto, trayendo consigo disminuciones en cultivos perennes, asociadas a la baja emisión de flores y la pérdida de nutrientes a causa de la erosión, escorrentía y percolación, relacionados con los excesos

hídricos. Así mismo, la fase cálida del ENSO, genera una disminución en la producción asociada a periodos prolongados de estrés hídrico en las zonas bajas y los valles interandinos.

El impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá antioqueño ha sido estudiado por Guarín (2011), a través de una correlación lineal entre la precipitación e índices como el MEI, el ONI y las temperaturas del mar del Niño 1+2 y Niño 3,4, los cuales representan los fenómenos climáticos que aportan la variabilidad. Se analizó el grado de asociación lineal entre los índices con la producción mensual de la zona bananera de Urabá (Cajas exportadas / ha), obteniendo como resultado que durante El Niño se adelantan los picos de cosecha y embolse y durante la Niña se atrasan. Existe una dependencia de las correlaciones de acuerdo a su proximidad, ya sea al océano Pacífico o Atlántico con los índices y las variables asociadas a los fenómenos de variabilidad climática que se dan en cada uno de ellos.

Los factores climáticos que intervienen en la productividad de los cultivos dependen de cada región, ocasionando un comportamiento específico de la planta (Jaramillo, 2005; González, 2007). Así mismo, componentes como la disponibilidad de agua y energía aportan en gran medida a la producción, son necesarios para el crecimiento y desarrollo de la planta (Ritchi, 1991). Cultivos como el café, necesitan un microclima específico para obtener un buen desarrollo (Gliessman, 2002). Algunos cultivos están adaptados a los patrones climáticos de los trópicos, pero son sensibles ante los contrastes en las condiciones climáticas (Carr, 2001; Ocampo, 2017).

Durante periodos del ENSO, la cosecha puede disminuir entre 40% y 80% según los registros encontrados en varias regiones tropicales (DaMatta et al., 2003; Salinas et al., 2002; Rueda et al., 2002; Ocampo, 2017).

La variabilidad climática en Colombia asociada al ENSO está caracterizada por el incremento en el número de días de déficit hídrico, aumentos en el brillo solar y en la temperatura (Ocampo 2017). Así mismo, la temperatura presenta variaciones más pronunciadas y disminuye la nubosidad ocasionando condiciones favorables para la floración (CENICAFE, 2011).

Se debe tener en cuenta que periodos prolongados con deficiencia de agua provocan marchitamiento de las hojas, afectan el crecimiento de los cultivos, las flores y el desarrollo normal de los frutos (Jaramillo, 2011). En el caso contrario, cuando se presentan largos periodos de lluvias a causa de La Niña, menor brillo solar y menor temperatura, los cultivos se mantienen en un estado de resguardo hasta que las condiciones vuelven a ser propicias para desarrollar su correspondiente floración (Jaramillo, 2011). En el cultivo de café, excesos en la humedad ocasionan disminución del crecimiento, amarillamiento de las hojas y pudrición de la raíz, llevando a la planta a su muerte (Jaramillo, 2011; Ocampo, 2017).

Autores como Jaramillo (2005b, 2011) y Ocampo (2013), han estudiado como influye la variabilidad climática en la caficultura y el agro. Otros autores como Camayo et al., (2003)

presentan que la influencia de variables climáticas como la temperatura, el brillo solar y la humedad del suelo están relacionadas con el crecimiento de los cultivos de café en la zona central de Colombia. Permiten ver que el empleo de la teoría de funciones de transferencia es una herramienta útil para la predicción del comportamiento de la floración de los cultivos, en respuesta a las variables climáticas.

En el departamento del Atlántico, Ruiz et al., (2013) han estudiado los efectos del ENSO en la precipitación y producción agrícola, encontrando que se presenta mejor rendimiento cuando los volúmenes de precipitación aumentan dependiendo del cultivo y la época en la que estos incrementos se presentan.

Cadena et al., (2004) determinaron el efecto del ENSO en la región de Tumaco en la producción de la palma de aceite, mediante correlaciones con variables climáticas, encontraron que las fases El Niño y La Niña producen alteraciones en las fases de desarrollo del cultivo, afectando la producción especialmente durante La Niña.

La Universidad Nacional de Colombia, CORTOLIMA y el Centro de Estudios para la Prevención de Desastres – CEPREVÉ (2015), han realizado estudios en el departamento del Tolima donde muestran una reducción del 30% al 50% en la cantidad de precipitación anual, causada por la variabilidad climática, lo que puede incrementar los periodos secos en la región (Ocampo, 2017).

El DNP (2012) ha realizado un estudio de impactos en la productividad de cultivos para Colombia como algodón, arroz, maíz, papa, banano, caña de azúcar, plátano y café, mediante modelos agroclimáticos que tienen en cuenta las variables climatológicas.

En el Quindío, Lince et al., (2015) han utilizado índices agroclimáticos para estimar la erosividad de la lluvia en la región cafetera de este departamento, encontrándola alta durante todos los meses del año.

Un estudio más profundo de la relación entre los índices del ENSO en sus fases cálida (El Niño), fría (La Niña) y el brillo solar en la zona cafetera colombiana, realizado por Ramírez et al., (2012), manifiesta que el brillo solar en la región es afectado por el calentamiento y enfriamiento del océano Pacífico ecuatorial, descrito por los índices ONI y MEI, los cuales se correlacionan de manera positiva para la totalidad de las estaciones y son estadísticamente significativas, a excepción de unas cuantas, para los periodos: diciembre a febrero y de junio hasta agosto. Las estaciones en la cordillera Central presentan la mayor correlación y número de meses con correlaciones significativas, sin ninguna influencia de la altitud ni la latitud, por el contrario, las estaciones ubicadas en el norte del país (Norte de Santander y Cesar) presentan una menor correlación.

En caldas, autores como Tafur et al., (2010) y Ramírez et al., (2007 y 2009) han realizado el análisis de diferentes índices agroclimáticos como el índice de erosividad, el índice de Fournier modificado y el índice de concentración de la precipitación, para medir la erosividad de las lluvias en el departamento, encontrando distribuciones uniformes y concluyendo que existe mayor riesgo a causa de la erosión hídrica en la zona cafetera.

Los efectos de la Oscilación del Sur en el régimen hidrológico de la cuenca del río Chinchiná, fueron analizados por Patiño et al., (2014) en donde se realizó el análisis de los

registros históricos para comprender la variabilidad climática natural y los efectos de los episodios cálidos (El Niño) y fríos (La Niña), que marcan diferentes condiciones hidrológicas en la cuenca. Se empleó el índice Oceánico de El Niño para la clasificación de las series históricas y la identificación de las anomalías en las variables climáticas. Los efectos del ENSO en la cuenca del río Chinchiná, en la fase La Niña, se traducen en incrementos superiores al 20% en la precipitación y al 30% para el caudal; por otra parte, se evidencian reducciones superiores al 10% en las precipitaciones y al 20% en el caudal, en los años con fase El Niño. Estas anomalías están influenciadas por los factores locales como la altitud.

Todos esos estudios mejoran el conocimiento de los efectos que ocasiona la variabilidad climática sobre la agricultura, pero todavía falta información sobre lo que pasa en otra clase de productos como por ejemplo el plátano o los cítricos, los cuales se encuentran entre los principales cultivos en Colombia.

2.1 Clima

El clima usualmente es entendido como el conjunto de condiciones medias en el largo plazo del tiempo atmosférico, agrupadas por épocas del año, no obstante, no es usual que los valores promedios mensuales de las variables meteorológicas que lo definen sean siempre estáticos, distintos fenómenos pueden influir en su variabilidad en alteraciones reflejadas a través de las anomalías climatológicas (Ocampo et al., 2014; IDEAM, 2005; Jaramillo, 2005).

Importantes estudios ya han sido realizados con el objetivo de identificar dichas afectaciones, sin embargo un esquema muy completo de las teleconexiones más importantes para la precipitación del país es el presentado por Montealegre (2009), quien seleccionó del océano y de la atmósfera los componentes del sistema climático que mayormente inciden en la variabilidad interanual de la precipitación del país y quien igualmente acepta como hipótesis: *“que los procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala, así como la variabilidad interanual de los océanos Pacífico Tropical y Atlántico Norte y Sur tienen una significativa relación con el comportamiento de la precipitación en Colombia”*, además examinó la sensibilidad de los índices que sintetizan estos procesos de manera cuidadosa, para poder seleccionar los de mayor conveniencia para detectar dicha asociación (Arango et al., 2014b).

Existen dos aspectos en el clima que no se deben confundir, el cambio climático y la variabilidad climática, el primero como el calentamiento global, ocasionado por un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, es un proceso a largo plazo y creciente (Pabón, 2003). Por otro lado, la variabilidad climática se refiere a procesos cíclicos naturales en el clima y pueden llegar a ser afectados por el cambio climático (OMM, 2013).

2.2 Variabilidad climática

Se define como variabilidad climática todos los cambios en el clima durante periodos de tiempo de meses, años o decenios. Estos cambios se obtienen mediante anomalías, siendo estas la diferencia entre el valor de la variable y su promedio, con valores que se encuentran por encima o por debajo de la normal climatológica, la cual representa el valor promedio de una serie continua de datos referentes a una variable climatológica que debe poseer información mayor a 30 años (Poveda, 2004; Montealegre, 2005; Montealegre et al. 2000, 2002; IDEAM, 2005, 2009; Pabón, 2011; OMM, 2013; Ocampo et al., 2014). La variabilidad climática son las oscilaciones climáticas cíclicas que dominan un sitio determinado, estos ciclos pueden presentarse en diferentes escalas temporales: diurno (24 horas), mensual, semestral, intra-anual, anual, interanual, decadal, secular y milenaria (Montealegre et al., 2002; Ocampo et al., 2014). Las escalas temporales más importantes se describen a continuación:

Estacional: identificada como la fluctuación a nivel mensual del clima, es la que define las temporadas de lluvia y sequía en las zonas tropicales, y las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño en otras latitudes. De esta escala dependen las decisiones que se toman en la planeación y preparación para un adecuado desarrollo de la agricultura. El movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) pertenece a este tipo de escala y la principal responsable de la variabilidad climática estacional, causante en gran porcentaje de la precipitación en Colombia (Montealegre et al., 2000, 2002; IDEAM, 2009). La ZCIT es un cinturón de baja presión que rodea al planeta sobre la región ecuatorial y formado por la convergencia de aire cálido y húmedo en latitudes al norte y sur del Ecuador. Este fenómeno genera intensa actividad convectiva, formando nubosidad, lluvias y tormentas por cada zona que recorre (IDEAM, 2005).

Intraestacional: identificada entre semanas y pocos meses, es destacada por una señal ondulatoria de 30-60 días y se encuentra asociada con las ondas de Madden-Julian descubiertas en 1971 (Montealegre et al., 2000, 2002; IDEAM, 2009).

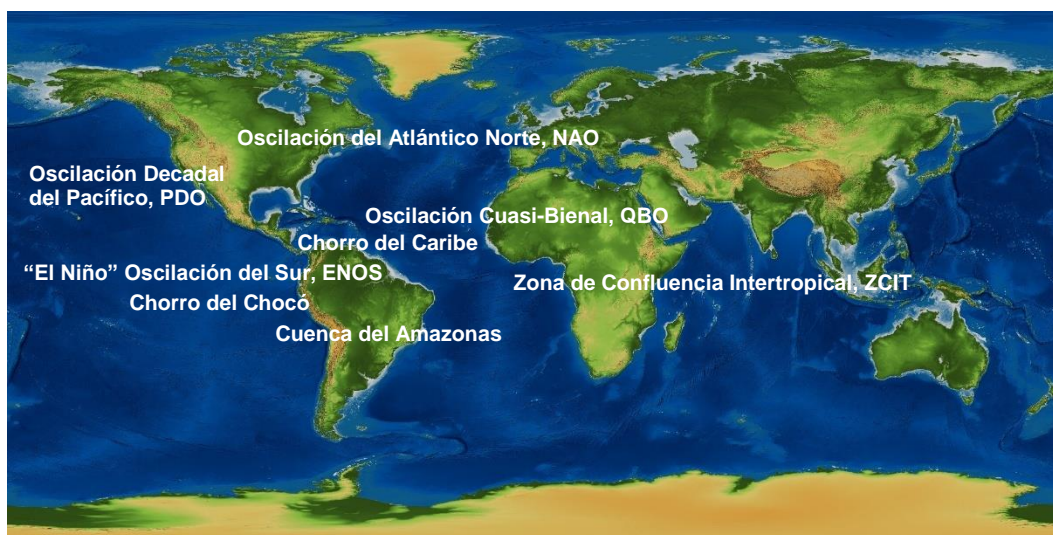
Interanual: se refiere a todas las variaciones que ocurren de año a año en las variables climatológicas. A esta escala pertenecen las fluctuaciones del ENSO (Montealegre et al., 2000, 2002; IDEAM, 2009).

Interdecadal: Son los cambios en el clima durante décadas, poseen menor amplitud que las variaciones interanuales pero sin embargo tienen gran influencia en el cambio de actividades antrópicas y tendencias de las variables climáticas (Montealegre et al., 2000, 2002; IDEAM, 2009).

Existen diferentes patrones de variabilidad climática en Colombia, estas son: rotación de la tierra sobre su propio eje, la rotación alrededor del sol, la Zona de Confluencia Intertropical – ZCIT, que en su fluctuación pasa dos veces sobre el país (marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre) ocasionando la bimodalidad de las lluvias (IDEAM, 2005; Eslava, 1993; Pabón et al., 1993; León et al., 2000; Mejía et al., 2000; Jaramillo, 2005; Ocampo et al., 2014; Vélez et al., 2015). El Niño Oscilación del Sur – ENSO, que ocurre generalmente cada 4 a 7 años, pero puede suceder antes. Las manchas solares que son

regiones más frías del sol, aparecen, crecen, se trasladan y desaparecen, traducándose en cambios en la insolación solar o radiación que recibe la tierra y con una periodicidad aproximada de 11.1 años (Pedreros, 2013). Los ciclos de Milankovitch, basados en los cambios en la órbita de la tierra, la variación del eje terrestre y la precesión de los equinoccios, que en su combinación pueden traer cambios en la insolación estacional de hasta 30% en latitudes altas (Poveda, 2004; Arévalo, 2010). Otros factores que afectan la variabilidad climática son las Ondas del Este, los Chorros del Chocó y Caribe, la cuenca del Amazonas, como se puede observar en la **Figura 2-1**, (Poveda et al., 1999; Pabón et al., 1998; Vélez et al., 2015).

Figura 2-1: Algunos factores que afectan la variabilidad climática.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Colombia, fenómenos como el ENSO (El Niño Southern Oscillation) en sus dos fases El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), presentan grandes efectos en la variabilidad climática provocando una alteración en los eventos climáticos como las sequías e inundaciones (IDEAM, 2015). Los fenómenos de variabilidad climática dominantes en el país son la Zona de Confluencia Intertropical a nivel intra-anual y el ENSO.

En esta investigación se va a realizar el análisis únicamente con el ENSO ya que es la principal causa de variabilidad climática interanual para Colombia (Poveda, 2004; IPCC, 2008).

2.2.1 El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés)

Es una oscilación, con frecuencias aproximadas de 4 a 7 años y duración de 1 año, del sistema Océano–Atmosférico en el Pacífico Tropical (Pabón, 2011). Presenta efectos como sequías, inundaciones, olas de frío y calor. La fase El Niño con episodios en intervalos entre dos y siete años (Dore, 2005) se presenta cuando existen aguas

superficiales anormalmente calientes en el océano Pacífico tropical, presión atmosférica anormalmente baja en Tahití y presión atmosférica anormalmente alta en Darwin (cerca de Australia), lo que puede ocasionar inundaciones en unas regiones y sequías en otras (OMM, 2005, 2012). Su contraparte, temperatura de la superficie del mar por debajo de lo normal, es llamada La Niña (SENAMHI, 2014; IDEAM, 2007). Esta última fase se presenta frente a las costas suramericanas intensificando los vientos alisios, la corriente ecuatorial, la corriente fría de Humboldt, emerge la termoclina, causando un aumento en la concentración de nutrientes en las aguas de las costas suramericanas y aumento en la frecuencia y abundancia de las precipitaciones (IDEAM, 2007, 2015). Esta fase contrasta en países vecinos como Perú y Ecuador en donde experimentan un clima mucho más seco (BBC Mundo, 2011; NOAA, 2016).

Cuando estos procesos ocurren, las aguas cálidas se concentran cerca de las costas asiáticas y en la Oceanía, provocando un refuerzo en el sistema de baja presión, fortaleciendo la circulación zonal de Walker, la cual termina favoreciendo la precipitación sobre el territorio colombiano (IDEAM, 2015).

La estimación de la fase actual de este fenómeno es posible mediante varios indicadores, entre los cuales se encuentra el índice multivariado (MEI, Multivariate Enso Index), que permite observar el comportamiento de la variabilidad interanual de las variables atmosféricas, donde los valores positivos indican la fase caliente del ENSO (El Niño) y los valores negativos la fase fría (La Niña). Otro indicador es el índice Oceánico de El Niño (ONI, Oceanic Niño Index), basado en la desviación de la temperatura superficial del mar (TSM) con respecto al promedio en la parte central del Pacífico tropical (IDEAM, 2015).

2.2.2 El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en Colombia

El Niño Oscilación del Sur (ENSO) es el principal modo de variabilidad interanual climática para Colombia (Poveda, 2004; Martínez et al., 2013), fenómeno asociado en su fase cálida con incremento en la temperatura media y reducciones en la humedad del suelo, la precipitación y la descarga de los ríos en el país (IDEAM, 1998).

Su fase opuesta, La Niña, produce reducción en la temperatura ambiente a nivel nacional, incremento de las lluvias en las regiones Caribe y Andina, reducción de la radiación solar y presenta efectos en la frecuencia de los ciclones tropicales del Caribe. Los impactos asociados a este fenómeno incluyen aumento significativo de los niveles de los ríos, incremento de la probabilidad de inundaciones, deslizamientos de tierra y crecientes súbitas en las zonas de alta pendiente (Montealegre, 2009; Velásquez et al., 2002; IDEAM, 2009).

Los efectos e impactos del ENSO y sus fases El Niño y La Niña, en la precipitación, temperatura, descarga de los ríos y humedad del suelo han sido ampliamente estudiados en Colombia (IDEAM, 1998; Salazar, 1990; Pabón et al., 1993; Poveda, 1994, 2004; Poveda et al., 1993, 1996, 1998, 2000, 2001, 2002, 2011; Waylen et al., 2002; Puertas et al., 2008; Hoyos et al., 2013).

Este fenómeno en la fase La Niña 2010-2011 causó grandes pérdidas económicas de aproximadamente 7.8 billones de dólares, mediante la afectación de alrededor de cuatro millones de colombianos relacionada con destrucción de infraestructura, inundaciones de cultivos y pagos de subsidios por el gobierno Nacional (Hoyos et al., 2013).

2.2.3 Índices climáticos

Los índices climáticos representan las variables meteorológicas y permiten determinar los efectos de fenómenos regionales como el ENSO. Existen diferentes índices que monitorean las oscilaciones climáticas a nivel global y regional con series hidrológicas y de precipitación lo suficientemente representativas para Colombia (IDEAM, 2015). En la **Tabla 2-1** se presentan los índices climáticos más representativos para Colombia, según el IDEAM (2015).

Tabla 2-1: Índices climáticos.

Acronimo	Índice	Descripción
PNA	Patrón del Pacífico y América del Norte	Patrón de variación de baja frecuencia en la circulación atmosférica y teleconexión sobre el Pacífico Norte y América del Norte
WP	Índice del Pacífico Oeste	Cambios en la localización e intensidad de la corriente de chorro del Pacífico Norte
NAO	Oscilación del Atlántico Norte	Cambios en la intensidad y posición de la corriente de chorro del Atlántico Norte, de la trayectoria de las tormentas y el transporte de calor y humedad sobre el Atlántico Norte
PDO	Oscilación decadal del Pacífico	Variabilidad interanual e interdecadal del Pacífico Norte
SOI	Índice de la Oscilación del Sur	Variabilidad interanual de la posición geográfica e intensidad de los centros de baja y alta presión sobre el Pacífico Sur Ecuatorial (ENSO)
MEI	Índice multivariado del ENSO	Variabilidad interanual del ENSO sobre el Pacífico Tropical
Niño 1+2 Niño 3 Niño 4 Niño 3,4	Índices del ENSO	Efectos de la variabilidad interanual del ENSO sobre la TSM en distintas regiones del Pacífico Tropical
BEST	Serie bivariada del ENSO	Variabilidad interanual de los procesos oceánicos y atmosféricos relacionados con el ENSO sobre el Pacífico Sur Ecuatorial
ONI	Índice Oceánico de El Niño	Eventos climáticos tropicales (ENSO) y extra tropicales en el Pacífico Norte
TNI	Índice Trans-Niño	Evolución del ENSO en el Pacífico Tropical
WHWP	Alberca cálida occidental	Anomalías de la TSM en la región del Pacífico Oriental Tropical, golfo de México y mar Caribe con TSM > 28.5°C
TNA TSA	Índice del Atlántico Norte/Sur tropical	Viabilidad de la TSM en la parte tropical del Atlántico Norte/Sur
AMO	Oscilación multidecadal del Atlántico	Variabilidad decadal de la TSM en el Atlántico Norte

Fuente: Adaptado (IDEAM, 2014).

A continuación, se presenta una breve descripción de cada índice.

2.2.3.1 El Índice Oceánico de El Niño (ONI por sus siglas en inglés)

Es un índice creado para determinar la ocurrencia de un evento ENSO en sus fases El Niño o La Niña, para la región Niño 3.4 del océano Pacífico ecuatorial, de la siguiente manera, según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica – NOAA (2017a):

- Un evento El Niño, como una secuencia de al menos 5 meses seguidos, cada uno con magnitud mayor o igual a +0,5 en el índice ONI.
- Un evento La Niña, también para la región Niño 3.4, como la secuencia de al menos 5 meses, cada uno con magnitud igual o menor que -0,5°C en el ONI.

Para establecer la ocurrencia de un evento ENSO se requiere como mínimo la anomalía de la temperatura de la superficie del mar durante siete meses consecutivos, ya que para la determinación del índice se considera la media móvil de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en la región Niño 3,4 para 3 meses consecutivos, la anomalía del mes que se está analizando, la anomalía del mes anterior a este, y la anomalía del mes siguiente:

$$ONI = \left(\frac{A_{i-1} + A_i + A_{i+1}}{3} \right)$$

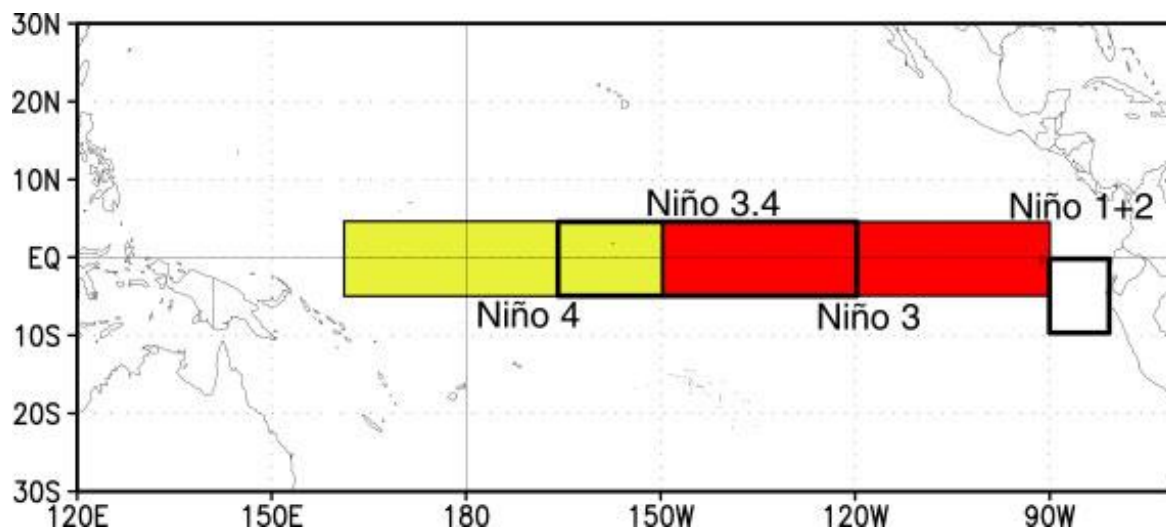
Donde, A_i es la anomalía de la temperatura superficial del mar del mes, A_{i-1} es la anomalía de la temperatura superficial del mar del mes precedente, A_{i+1} es la anomalía de la temperatura superficial del mar de mes siguiente al mes dado.

El periodo de referencia para el cálculo de las anomalías es de 30 años, comprendiendo el periodo de 1971-2000, sin embargo, desde el 1950 la temperatura de la región del Niño-3,4 ha presentado una tendencia a aumentar de manera significativa, y debido a que el periodo de referencia es fijo, no es manifestada en los análisis, la variabilidad interanual del ENSO. Una nueva estrategia para la definición del periodo base se ha implementado, en donde los 30 años están asociados al análisis de las anomalías en un rango de 5 años, y el periodo de referencia para el cálculo considera los 15 años precedentes, los 5 años de análisis y los 10 años siguientes, una vez transcurrido este periodo, se continua con el análisis de los próximos 5 años y al mismo tiempo el periodo base es trasladado, es decir, el ONI será calculado con periodos bases centrados a 30 años y actualizados cada 5 años. Esto permite que los eventos ENSO sean definidos por su climatología contemporánea. (NOAA, 2017; IDEAM, 2014).

2.2.3.2 Anomalía de la Temperatura Superficial del Mar en las regiones El Niño 1+2, 3 y 4

La determinación de la ocurrencia de un fenómeno ENSO se encuentra monitoreando constantemente las alteraciones de las variables que lo manifiestan. Un buen indicador de la estructura térmica de la capa superior de los océanos y de los procesos convectivos que se generan en la atmósfera es la temperatura superficial del mar - TSM sobre la franja tropical del pacífico, en la cual se han delimitado y definido 4 regiones, ver **Figura 2-2**, con el fin de estudiar y vigilar el ENSO: región Niño 4 (Occidental), región Niño 3 (Central), región Niño 3,4 (Centro-occidental) y región Niño 1+2 (Oriental). La temperatura de la superficie del mar (TSM) en grados Celsius es medida en cada una de estas regiones (Botero, 2015).

Figura 2-2: Regiones del ENSO.



Fuente: (NOAA, 2017b).

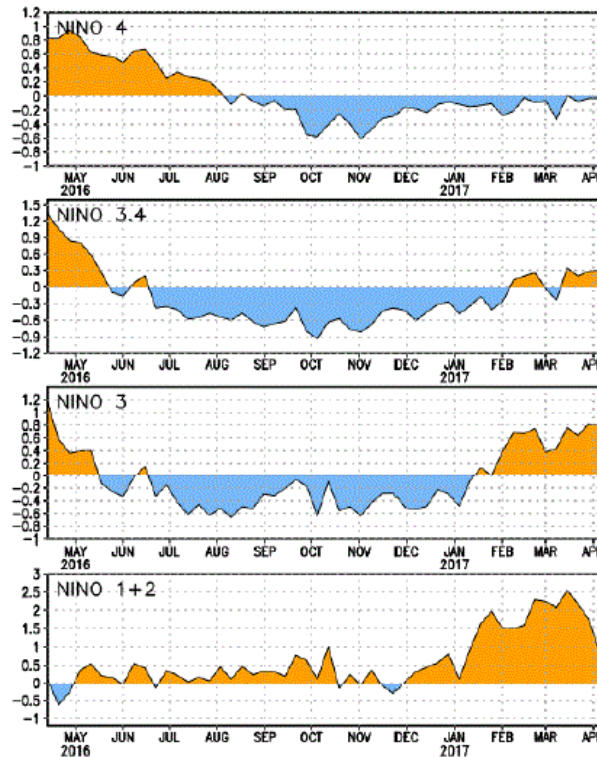
La temperatura superficial del mar, en las regiones El Niño 1+2, 3, 4, y 3,4, trata de describir el comportamiento de la termoclina de la zona tropical del pacífico, donde el cambio en el comportamiento de la misma, se considera como un rasgo característico de un evento ENSO y se ve reflejado en la temperatura de la capa superficial del mar (Botero, 2015).

La termoclina es la capa por debajo de la capa superficial del mar que presenta un cambio brusco de depreciación de la temperatura entre la capa superficial y la capa interior. Las temperaturas en la zona aumentan hasta 4°C en condiciones normales, pero cuando se presenta un evento ENSO, el calentamiento supera este límite y es de mayor duración (Botero, 2015).

Adicional a las mediciones de la TSM, se utilizan como indicador las anomalías, definidas como la diferencia entre un valor mensual cualquiera y su promedio climatológico o valor normal en el periodo 1982-2010. Las categorías por debajo y encima de lo normal por

defecto, son definidas por los percentiles 66 y 33. Las anomalías de la TSM en las regiones Niño 3 y Niño 3,4, se han convertido en las más utilizadas en los últimos tiempos. (IDEAM, 2014; Botero, 2015). A continuación, en la **Figura 2-3**, se presentan diferentes anomalías de la temperatura en la superficie del mar para cada región del ENSO.

Figura 2-3: Anomalías TSM en cada región del ENSO.

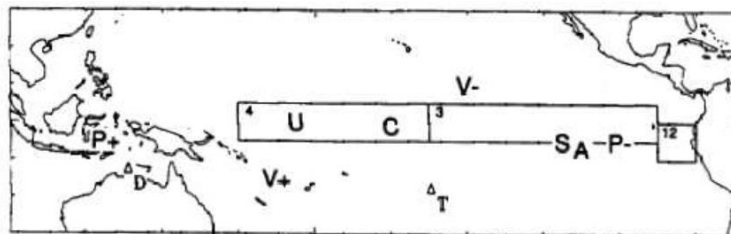


Fuente: (NOAA, 2017c).

2.2.3.3 Índice Multivariado del ENSO (MEI por sus siglas en inglés)

Es un índice creado por Wolter (1987) para la determinación del ENSO, basado en la combinación lineal de 6 variables oceánico-atmosféricas que describen el sistema climático, como se presentan en la **Figura 2-4** (IDEAM, 2014).

Figura 2-4: Variables oceánico-atmosféricas.



Fuente: (Wolter et al., 1998).

Presión atmosférica a nivel del mar (P), Viento de superficie zonal (U) y Meridional (V), Temperatura del mar (S), Temperatura del aire en superficie (A), Fracción de nubosidad en el cielo en la región Niño 4 (C), 1, 2, 3 y 4 las regiones El Niño 1+2,3,4 respectivamente.

El MEI considera la influencia que tiene cada una de las variables anteriormente mencionadas a través de un promedio ponderado de las características que definen un evento ENSO, distribuidas espacialmente en 4x4 grados de resolución en la zona del pacífico ecuatorial, a partir de las cuales se crean series de tiempo que son normalizadas, calculando las anomalías bimestrales de los respectivos promedios del periodo de referencia (1950-1993) y dividiéndolas por las desviaciones estándar respectivas para centrarse en el comportamiento más coherente y no en la alta varianza local. Los valores del MEI positivos representan la fase caliente del ENSO (El Niño) y los negativos, la fase fría (La Niña) (IDEAM, 2014; NOAA, 2017d; Montealegre, 2009).

2.2.3.4 Índice de la Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés)

El ENSO está compuesto por una componente oceánica y una componente atmosférica. La componente atmosférica es la Oscilación del Sur, la cual representa de forma conceptual el cambio de presión en el Pacífico. Para lograr monitorear el delta de presión se tiene un centro de monitoreo al oeste del Pacífico en Papeete, (Tahiti 18°s,150°C) que en condiciones normales es generalmente un centro de alta presión. Mientras que al este del Pacífico cerca de Darwin (12°S,131°E), en Indonesia y el norte de Australia se presenta un centro de baja presión (Botero, 2015).

La Oscilación del Sur (OS) se encuentra en su fase positiva (La Niña) cuando la presión atmosférica aumenta en el lado este del Pacífico y desciende en el lado oeste. La OS está en su fase negativa (El Niño) cuando la presión se eleva en el oeste y disminuye en el este.

El SOI es un índice que compara la presión atmosférica del océano Pacífico este, medida en Tahiti, con la presión del océano Pacífico oeste medida en Darwin, Australia y se considera como una desviación estandarizada de la situación normal como se expresa a continuación:

Desviación estándar de la presión en Tahití (TA):	Desviación estándar de la presión en Darwin (DR):
$\sigma_{TA} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(SLP_{TA}^i - \overline{SLP}_{TA})^2}{N}}$	$\sigma_{DR} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(SLP_{DR}^i - \overline{SLP}_{DR})^2}{N}}$
<p>SLP_{TA}: Presión a nivel de superficie en Tahití. N: es el número de meses.</p>	<p>SLP_{DR}: Presión a nivel de superficie en Darwin. N: es el número de meses.</p>

A continuación, se definen cuantas desviaciones por encima o por debajo está la presión actual en cada región.		
Tahití estandarizada, STA		Darwin estandarizada, SDR
$\frac{SLP_{TA}Actual - \overline{SLP}_{TA}}{\sigma_{TA}}$		$\frac{SLP_{DR}Actual - \overline{SLP}_{DR}}{\sigma_{DR}}$
Desviación Estándar Mensual:	$MSD = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(STA_i - SDR_i)^2}{N}}$	Expresa la desviación típica mensual de TA y DR.
Desviación estandarizada de la situación normal:		
$SOI = \frac{STA - SDR}{MSD}$		
Un índice fuertemente negativo es asociado con un evento El Niño y un índice fuertemente positivo con un evento La Niña (contrario a la nomenclatura del ONI).		

2.2.3.5 Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés)

No toda la variabilidad climática presente en Colombia está determinada por el ENSO, también existen otras variaciones climáticas naturales como la NAO con un grado menor de influencia, que en conjunto con otros fenómenos contribuyen a que la variabilidad climática aumente y genere un alto impacto (Botero, 2015).

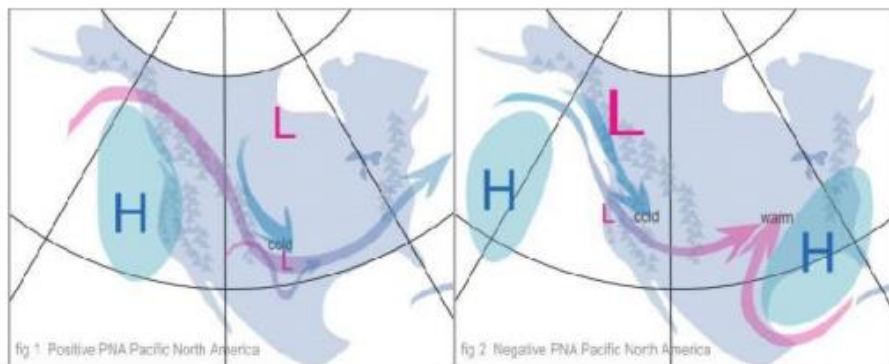
La Oscilación del Atlántico Norte está determinada por la variación de las presiones entre la región subtropical (Azores) de alta presión y la región polar de baja presión (Islandia). El índice cambia de magnitud cada año, pero permanece varios años en la misma fase. Se dice que se encuentra en fase positiva cuando la presión es anormalmente alta en las Azores y anormalmente baja en Islandia, con fuertes vientos del oeste e inviernos menos fríos más lluviosos, mientras que cuando la NAO se encuentra en fase negativa, las presiones se encuentran anormalmente débiles en ambos sitios, y los vientos del oeste son débiles, presentando inviernos fríos y con más nieve (Botero, 2015).

2.2.3.6 Patrón del Pacífico y América del Norte (PNA por sus siglas en inglés)

El patrón del Pacífico y América del Norte, como su nombre lo indica, describe las variaciones en la circulación atmosférica sobre el océano Pacífico y Norteamérica, y es uno de los más influyentes durante el invierno en dicha zona. Se presenta como anomalías en los campos de altura geopotencial, es decir, variaciones de la distancia vertical que

existe entre el nivel medio del mar y ciertos niveles de presión constante (isobáricos) típicamente a los 700 y 500 hPa observados en el norte del Pacífico y en ambos lados de Estados Unidos (este y oeste) (Wallace et al., 1981). A continuación, en la **Figura 2-5**, se presentan las diferentes fases del PNA.

Figura 2-5: Fases del PNA, positiva (derecha) y negativa (izquierda).



Fuente: (NCCO, 2017).

Existe una conexión débil entre el PNA y el ENSO, por lo que la fase positiva del PNA tiende a estar asociada con los episodios cálidos (El Niño) en el Pacífico y la negativa con los fríos (La Niña), es importante resaltar que en los años de ocurrencia del ENSO se ha observado una mayor incidencia del PNA, lo que incrementa la frecuencia e intensidad del flujo de los vientos provenientes de la región subpolar sobre el centro de EE.UU. y el Golfo de México en invierno y primavera, trayendo como consecuencia una disminución de la temperatura sobre la región (Jiménez, 2014).

El índice del patrón del Pacífico y América del Norte lo definieron Wallace y Gutzler en 1981 como:

$$PNA = 0.25 * [Z(20^{\circ}N, 160^{\circ}O) - Z(45^{\circ}N, 165^{\circ}O) + Z(55^{\circ}N, 115^{\circ}O) - Z(30^{\circ}N, 85^{\circ}O)]$$

Donde Z son los valores estandarizados de la altura geopotencial de 500 hPa.

2.2.3.7 Índice del Pacífico Oeste (WP por sus siglas en inglés)

Detallado por Barnston et al., (1987) y Wallace et al., (1981), es un patrón primario de variabilidad de baja frecuencia sobre el Pacífico Norte en todos los meses del año. Durante el invierno y la primavera, el patrón consiste en un dipolo norte-sur de anomalías, con un centro ubicado sobre la península de Kamchatka y otro amplio centro de signos opuestos que cubre porciones del sudeste asiático y el Pacífico subtropical occidental del norte. Las fases fuertes, ya sean positivas o negativas de este patrón, reflejan variaciones zonales y meridionales pronunciadas en la ubicación e intensidad de la región de entrada del vapor de chorro del Pacífico (o Asia oriental). Estas anomalías presentan un fuerte cambio hacia el norte desde el invierno hasta el verano, y a su vez es consistente con el desplazamiento hacia el norte observado de la corriente en chorro del este de Asia. Un tercer centro de

anomalías está ubicado sobre el este del Pacífico Norte y el suroeste de los Estados Unidos en todas las estaciones (NOAA, 2017e).

Temperaturas por encima de la media en las latitudes más bajas del Pacífico Norte occidental, en invierno y primavera, se encuentran asociadas al índice del Pacífico Oeste en su fase positiva, mientras que con temperaturas inferiores a la media en el este de Siberia se asocia para todas las estaciones. Igualmente se presenta una relación con precipitaciones superiores a la media en todas las estaciones en las latitudes altas del Pacífico Norte y a precipitaciones inferiores a la media en el Pacífico Norte central, especialmente durante el invierno y la primavera (NOAA, 2017e).

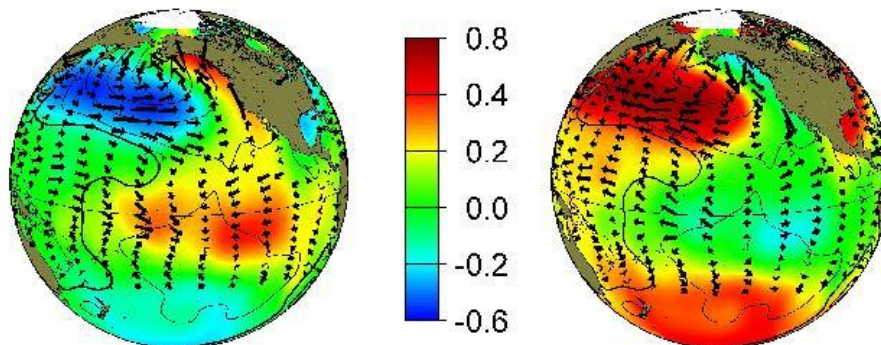
2.2.3.8 Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés)

El índice de la Oscilación Decadal del Pacífico, manifiesta las variaciones mensuales de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico al norte de los 20°N y posee una periodicidad entre 15 y 20 años. El clima de Norteamérica se ve influenciado fuertemente por los cambios de temperatura en la región del PDO, ocasionando alteraciones en el patrón de los vientos y tormentas. La fase positiva del índice se da cuando la temperatura es irregularmente cálida a lo largo de la costa de Norteamérica, Centroamérica y el Ecuador y fría en el interior del Pacífico Norte. Por otro lado, el índice es negativo cuando la distribución se invierte (Trenberth et al., 1994; Jiménez, 2014).

En los años 1925, 1947 y 1977 se presentaron cambios de fase en el índice, y durante el periodo 1977 a 1997 los valores positivos fueron los dominantes. Últimamente se han tenido registros negativos, a excepción de los años 2002 a 2006 y 2009 a 2010 (Jiménez, 2014).

En la **Figura 2-6** se pueden observar las condiciones típicas en el océano Pacífico durante las fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) del PDO. Los colores muestran las anomalías de la temperatura (°C) y las flechas la dirección de los vientos dominantes, la cual se invierte entre ambas fases.

Figura 2-6: Condiciones típicas en el océano Pacífico durante las fases del PDO.



Fuente: (UW, 2017).

2.2.3.9 Índice Bivariado del ENSO - BEST

El índice BEST, índice bivariado del ENSO, se calcula a partir de la combinación de una normalización de las series de tiempo SOI y TSM del Niño 3,4 (Montealegre, 2009). Fue diseñado para ser simple de calcular y proveer un índice a largo plazo del ENSO para la investigación. Ya que el índice Niño 3,4 ha sido utilizado para medir la fuerza del ENSO en el Pacífico tropical, pero deja aparte procesos atmosféricos, ha sido necesario encontrar una forma de incluirlos. La solución fue añadir el índice SOI a la ecuación, de esta manera los procesos atmosféricos se tienen en cuenta más directamente. Adicionalmente, al tener el SOI una mejor medición histórica, los sesgos al calcular la TSM se reducen (Smith et al, 2000; NOAA, 2016).

2.2.3.10 Índice del Atlántico Norte Tropical (TNA por sus siglas en inglés)

El TNA hace referencia a las anomalías de la TSM, promediadas entre las coordenadas 20°O a 60°O y 6°N a 18°N, 20°O a 10°O y 6°N a 10°N, durante una serie de tiempo. Se encuentra altamente relacionado con los procesos globales que se producen en el trópico, particularmente con las condiciones en la región Niño 3 (Penland et al., 1998; Jiménez, 2014).

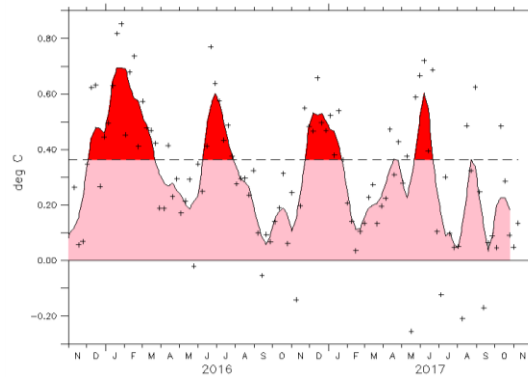
Los diferentes procesos de escala global que afectan la TSM en el Atlántico tropical son identificados por los índices climáticos, de ahí que se presenten fluctuaciones en cada uno de los índices. Los cambios en el TNA se hacen semejantes a las del índice AMO, sin embargo, presenta ligeras variaciones (Jiménez, 2014).

2.2.3.11 Índice del Atlántico Sur Tropical (TSA por sus siglas en inglés)

El índice TSA fue definido por Enfield et al., (1998), encontrando patrones dipolares a través del Atlántico tropical con una periodicidad de 8 a 12 años para el invierno y la primavera boreal, y de 2.3 años para el verano y otoño boreal.

El TSA es calculado mediante la temperatura superficial del mar en la región 30°W - 10°E, 20°S - 0° y es un indicador de las temperaturas de la superficie en el Golfo de Guinea, el Océano Atlántico tropical sur oriental (NOAA, 2017f).

En la **Figura 2-7** se ilustra el comportamiento del TSA para los años 2016 y 2017, se presentan con signo positivo los promedios semanales y los valores promedio mensuales se muestran en las regiones sombreadas. La desviación estándar semanal del índice durante el período 1982 - 2005 se indica en la gráfica.

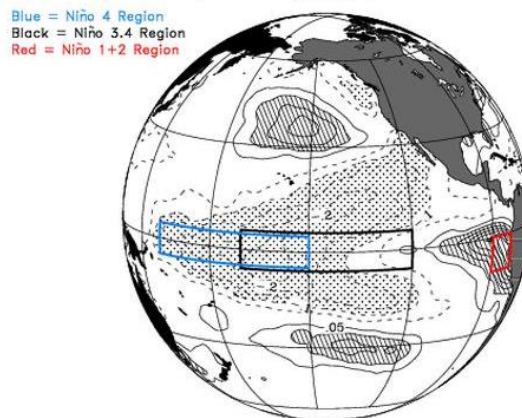
Figura 2-7: Comportamiento del índice TSA.

Fuente: (NOAA, 2017f).

2.2.3.12 Índice Trans-Niño (TNI por sus siglas en inglés)

En diversas regiones del Pacífico se han analizado las anomalías de la temperatura de la superficie del mar para identificar la naturaleza del ENSO. Trenberth et al., (2001) sugieren que para realizar una caracterización óptima de la evolución y carácter de cada evento asociado con El Niño o La Niña se hace necesario el uso de al menos dos índices. El primero a tener en cuenta, son las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región del Niño 3,4, y el segundo, es el índice Trans-Niño (TNI), resultante de la diferencia entre las anomalías normalizadas de la temperatura superficial del mar en las regiones Niño 1+2 y Niño 4. Desde otro punto de vista, el primer índice se puede considerar como la TSM media a lo largo del Pacífico ecuatorial al este de la línea de tiempo y el segundo índice es el gradiente de TSM en la misma región (Trenberth et al., 2001, 2016; NCAR, 2017).

En la **Figura 2-8** se aprecia la regresión de anomalías globales de TSM con TNI entre 1900 y 1976 en °C. Los valores que superan los 0.10°C se somborean y se puntúan los menores a -0.10°C. Los contornos son $\pm 0.05^\circ\text{C}$, $\pm 0.10^\circ\text{C}$, $\pm 0.15^\circ\text{C}$, etc.

Figura 2-8: Regresión de anomalías globales de TSM con TNI (1900 – 1976).

Fuente: (NCAR, 2017).

Se calcula con la TSM total promediada del área de la región Niño 1+2 y la TSM total promediada del área de la región del Niño 4. Considera las climatologías mensuales (1950 - 1979) para la TSM total promediada del área de la región Niño 1+2 y la región del Niño 4, y resta las climatologías de la serie temporal promedio de TSM para obtener anomalías. Normaliza cada serie de anomalías con sus respectivas desviaciones estándar durante el período climatológico 1950 - 1979. El TNI se obtiene mediante la diferencia entre las anomalías normalizadas en la región Niño 1+2 y las anomalías normalizadas en la región Niño 4. Posteriormente, se suaviza el TNI con una media móvil de 5 meses y finalmente se normaliza el resultado con su desviación estándar durante el período climatológico 1950-1979. El TNI suavizado tiene una desviación estándar de 0.818 durante el período climatológico 1950-1979 (NCAR, 2017).

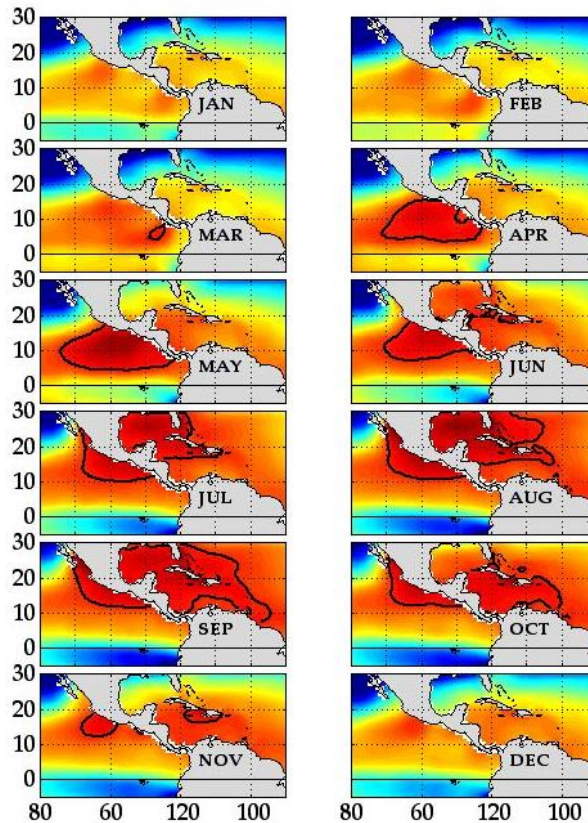
2.2.3.13 Alberca Cálida Occidental (WHWP por sus siglas en inglés)

El Western Hemisphere Warm Pool (WHWP) es una región con temperaturas de la superficie del mar más cálidas que 28.5°C que se desarrolla al oeste de América Central en la primavera y luego se expande a las aguas tropicales hacia el este (Wang et al., 2003).

El ciclo anual del WHWP se presenta en la **Figura 2-9**, incluye el Océano Atlántico tropical (TNA) al este de las Antillas Menores, el Mar Caribe, el Golfo de México y el océano Pacífico Norte oriental (ENP).

Un ciclo de calentamiento WHWP comienza con calor en el este del Pacífico Norte en la primavera. Un patrón de dipolos fuera de América Central aparece debido a oleadas de aire más frío y seco proveniente del golfo de México. Durante la primavera, las albercas cálidas crecen y se fusionan. Su calidez y humedad alimentan al monzón mexicano. En verano, la calidez se extiende por las áreas del Golfo de México y el Caribe (Wang et al., 2001).

A través de los registros climáticos se ha demostrado una relación entre el ENSO y el WHWP. Durante la presencia de un invierno normal en el hemisferio norte, el calentamiento sobre la región del Amazonas conduce una celda de Hadley con aire descendiente sobre un anticiclón al norte de 20°N en el Atlántico subtropical y los vientos alisios asociados del noreste entre África y el Caribe. La fase El Niño del ENSO debilita la célula amazónica, el anticiclón y los vientos alisios orientales, ocasionando que el Atlántico Norte tropical presente alteraciones en su temperatura, incrementándose más de lo normal en la primavera. Aproximadamente la mitad de los eventos asociados a El Niño permanecen lo suficiente durante los meses de primavera, causando que el conjunto cálido se vuelva inusualmente grande para el verano (Wang, 2004).

Figura 2-9: Ciclo anual del WHWP.

Fuente: (NOAA, 2017).

2.2.3.14 Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés)

Los ciclos en la temperatura superficial del mar presentes en el Atlántico Norte a mediano plazo, son descritos por el AMO. Las diferentes fases frías y cálidas tienden a durar entre 20 a 40 años, y los valores extremos cambian alrededor de 1.8°C. Es una oscilación que se presenta en la mayor parte del océano entre la región de Groenlandia y El Ecuador, afectando en algunas ocasiones el Pacífico Norte. Crea variaciones en la temperatura del aire y la precipitación de Norteamérica y Europa, asociándose a la frecuencia de sequías y huracanes más intensos (Jiménez, 2014).

El incremento en la cantidad de huracanes presentes en el Atlántico desde 1995 se ha relacionado con la fase positiva de la AMO. Esto puede estar ocasionado por la combinación de fenómenos como la intensificación del Monzón de África Occidental, la disminución de la convección sobre la cuenca del río Amazonas, la expansión de los vientos en dirección este movilizándose por las capas superiores de la atmósfera, dando lugar a vientos alisios débiles a través del Atlántico tropical, elevando la temperatura superficial del mar, reduciendo la cizalladura vertical del viento e intensificando la corriente que se dirige desde África hacia el este (Jiménez, 2014).

2.3 Agroclimatología

La agroclimatología es una rama de la climatología que estudia todos los efectos de la variabilidad climática en la agricultura y los cultivos de una región. Todos los factores climáticos que afectan el desarrollo de los cultivos son de vital importancia para una buena producción de estos. Variables como la radiación solar, la precipitación, la evapotranspiración, la humedad relativa, la amplitud térmica y la temperatura intervienen en los procesos físicos y bioquímicos necesarios para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas (Ritchie, 1991).

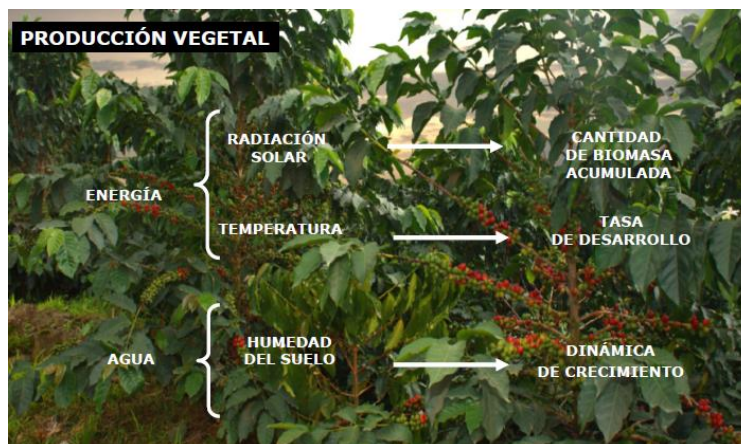
Las fases, etapas y periodos críticos son importantes periodos fenológicos de los cultivos. Se entiende como fase al fenómeno de aparición, transformación o desaparición rápida de los órganos vegetales (floración, espigamiento, madurez, etc). Una etapa se compone por dos fases consecutivas, y es vital para conocer las características ecológicas de un vegetal. Un periodo crítico es el intervalo durante el cual se presenta la máxima sensibilidad ante un cambio en la planta, ocasionando que las oscilaciones en los valores de los fenómenos meteorológicos se reflejen en el rendimiento del cultivo (Torres, 2006).

La producción de materia seca y el uso del agua son proporcionales a la radiación solar interceptada por el follaje, desde que no existan limitaciones de disponibilidad de agua y nutrientes (Jaramillo, 2011).

La temperatura del aire controla la tasa de desarrollo de las plantas, así mismo como la distribución de la precipitación y disponibilidad de agua en el suelo afectan el crecimiento de la misma. Cuando el crecimiento esté limitado por el agua, la evapotranspiración acumulada determinará la tasa de producción de materia seca (Jaramillo, 2011).

En la **Figura 2-10**, se pueden observar las variables agroclimáticas que tienen una importante influencia sobre la producción vegetal, como la disponibilidad de energía y agua, las cuales son utilizadas por la planta en diferentes procesos como la fotosíntesis y la transpiración (Jaramillo, 2011).

Figura 2-10: Elementos agroclimáticos determinantes en la producción vegetal.



Fuente: (Jaramillo, 2011; Ritchie 1991).

Es importante destacar que el crecimiento de las plantas no depende solamente del clima, existen otros factores que afectan este desarrollo entre los cuales se encuentran el nivel de degradación del suelo, la materia orgánica disponible, las prácticas agrícolas. Sin embargo, para esta investigación solamente se analizarán las variables meteorológicas, los índices climáticos y los indicadores agroclimáticos, para entender bien su comportamiento durante el fenómeno de variabilidad climática y sus efectos en los cultivos, ya que el enfoque será hídrico (afectado por la parte climática) y no sobre las condiciones del suelo.

2.4 Índices agroclimáticos

Los índices agroclimáticos permiten analizar la interacción entre la variabilidad climática y los cultivos agrícolas. A continuación, se presentan los índices que se van a analizar en esta investigación.

2.4.1 Tiempo térmico - TT

Es la cantidad constante de calor que necesitan los organismos para su crecimiento y desarrollo. Son los grados acumulados de temperatura promedio diaria menos una temperatura base, a partir de la cual se inicia el crecimiento del cultivo. Es fundamental para una buena floración, para ésta se requiere un mínimo de 1100°C acumulados por trimestre en el caso del café (Ramírez et al., 2010, 2013).

2.4.2 Amplitud térmica - AT

Se refiere a la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima a nivel diario, la cual varía dependiendo de la radiación solar de la zona. Es necesario que no se presenten más de 50 días con una amplitud térmica menor a 10°C para un adecuado desarrollo de la floración del café (Ramírez et al., 2010, 2013). Esto quiere decir que entre mayor sea la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima, se crea un ambiente más favorable para la floración. Este índice es importante, ya que, en las regiones tropicales los cambios estacionales de temperatura no son tan marcados en comparación con las variaciones diarias, que sí lo son (Ramírez et al., 2013).

2.4.3 Índice de déficit de brillo solar - DBS

Una adecuada cantidad de energía, representada por el brillo solar, es necesaria para un correcto desarrollo de los cultivos; cuando se presenta un déficit de ésta se generan alteraciones en la floración y por ende en la futura producción de la planta (Ramírez et al., 2013). El DBS es la diferencia entre el brillo solar astronómico posible y el brillo solar observado en la superficie a 1.5m. El brillo solar astronómico, definido como la cantidad de brillo solar que llega al borde de la atmósfera, depende de cada época del año y la latitud de la zona donde se mida. (Ramírez et al., 2010, 2013).

2.4.4 Índice de concentración de la precipitación - ICP

Propuesto por Oliver en 1980, permite comprender cómo se encuentra distribuida la precipitación en un intervalo determinado de tiempo (Ramírez et al., 2007), por lo que, con distribuciones mensuales idénticas de precipitación, el valor obtenido de ICP será idéntico para diferentes cantidades, es por esto que el índice cuantifica la agresividad de la lluvia únicamente desde la perspectiva de la concentración (Luis et al., 1997; Iskander et al., 2014).

Teniendo en cuenta la **Tabla 2-2** de clasificación del índice, los valores ICP inferiores a 10 indican una distribución mensual uniforme de precipitación en el año, mientras que valores entre 11 a 20 indican estacionalidad en la distribución de lluvia, pero si toma valores superiores a 20 corresponden a climas con una variabilidad mensual sustancial en cantidades de lluvia (Luis et al., 2000; Murugan, 2008).

Tabla 2-2: Clasificación del índice de concentración de la precipitación.

ICP	Clasificación
8,3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente Estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Altamente Estacional
50 - 100	Irregular

Fuente: (Oliver, 1980; Michiels et al., 1996).

Por ejemplo, si la precipitación en cada uno de los meses del año es similar tendrá valores cercanos a 8.3 y si por el contrario se ven concentradas durante un mes, los valores del índice serán cercanos a 100 (Tafur et al., 2010; Besteiro, 2011).

2.4.5 Índice de Fournier modificado – IFM

Fournier (1960) creó un modelo de estimación de la producción de sedimentos que considera elementos en suspensión y acarreo, teniendo en cuenta la correlación existente entre las características de la cuenca y los sedimentos emitidos por ésta (Besteiro, 2011). Dentro de su modelo necesitaba considerar un parámetro representativo del factor climático, para ello estableció el índice de agresividad climática, expresado en la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de Fournier} = \frac{Pm^2}{Pt}$$

Donde, Pm es la precipitación del mes más húmedo del año en mm, Pt es la precipitación total del año en mm.

El índice de Fournier no considera la distribución mensual de la lluvia a lo largo del año, por lo que no siempre aumenta cuando aumenta el número de precipitaciones erosivas en el año (Ferro, 1991). Para evitar este inconveniente, Arnoldus en 1977 incorpora el criterio anterior al índice de Fournier y permite estimar la agresividad de la lluvia considerando la

distribución mensual de las precipitaciones (Ramírez et al., 2007). Lo llama el índice de Fournier modificado y su clasificación se realiza a partir de la **Tabla 2-3**.

Tabla 2-3: Clasificación del índice de Fournier modificado.

Clase	IFM	Agresividad
1	< 60	Muy Baja
2	60 – 90	Baja
3	90 – 120	Moderada
4	120 – 160	Alta
5	> 160	Muy Alta

Fuente: (Arnoldus, 1980).

2.4.6 Índice de erosividad - IE

Permite conocer la erosividad a causa de la precipitación (Ramírez et al., 2007). La erosión por lluvia es definida como la pérdida continua de los diferentes componentes del suelo, por el efecto que producen las gotas de lluvia, de dispersión de agregados del suelo y su arrastre por la escorrentía superficial (Hellin, 2004; Meyer, 1984). Por tanto, es considerada como uno de los factores más importantes de pérdida de suelos (Shamshad, 2008). Su estudio es relevante para la planeación y ordenación de cuencas hidrográficas (Oliveira et al., 2014).

El Modelo Universal Soil Loss Equation – USLE, definida por Wischmeier y Smith en 1958, es el más utilizado a nivel global para predecir la tasa media anual de erosión del suelo. En este modelo, el valor promedio de las pérdidas de suelo (A), es proporcional a la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), el factor de relieve (LS), el factor de cubierta vegetal (C) y el factor de prácticas de conservación de suelos (P). Se han realizado mejoras al modelo original, como la versión modificada MUSLE (Williams, 1975) que agrupa parámetros por evento de lluvia, el Método OnstadFoster (Onstad et al., 1975) que estima el desprendimiento y transporte del suelo, la versión revisada RUSLE (Renard et al., 1997), que estima los parámetros mediante nuevos métodos con el fin de incluir la variabilidad espacio-temporal (Wall et al., 2002), entre otras derivadas de la USLE.

El factor R que representa la erosividad de la lluvia, según el modelo USLE, se calcula a partir de la energía total de la tormenta (E) y la intensidad máxima en 30 minutos (I30) (Wischmeier et al., 1978). Indica como el desprendimiento de partículas es combinado con la capacidad de transporte (Renard et al., 1997), es decir, permite conocer la capacidad de las lluvias de causar erosión (Lafren et al., 2003; Tafur et al., 2010).

Para su determinación se necesita obtener la hora de inicio, la cantidad de agua caída y la distribución de la lluvia en el tiempo, en las que se puedan identificar períodos continuos de treinta minutos (Paulet, 1973), así mismo identificar todas las lluvias que igualan o exceden 10 mm y se consideren independientes por estar separadas por períodos de seis horas o más. Esta información solo puede ser aportada por instrumentos como el pluviógrafo que generalmente son escasos y en muchos países solo se cuenta con

medidas de pluviómetro, haciendo el índice de erosividad un parámetro difícil de estimar (Gabriels et al., 2003).

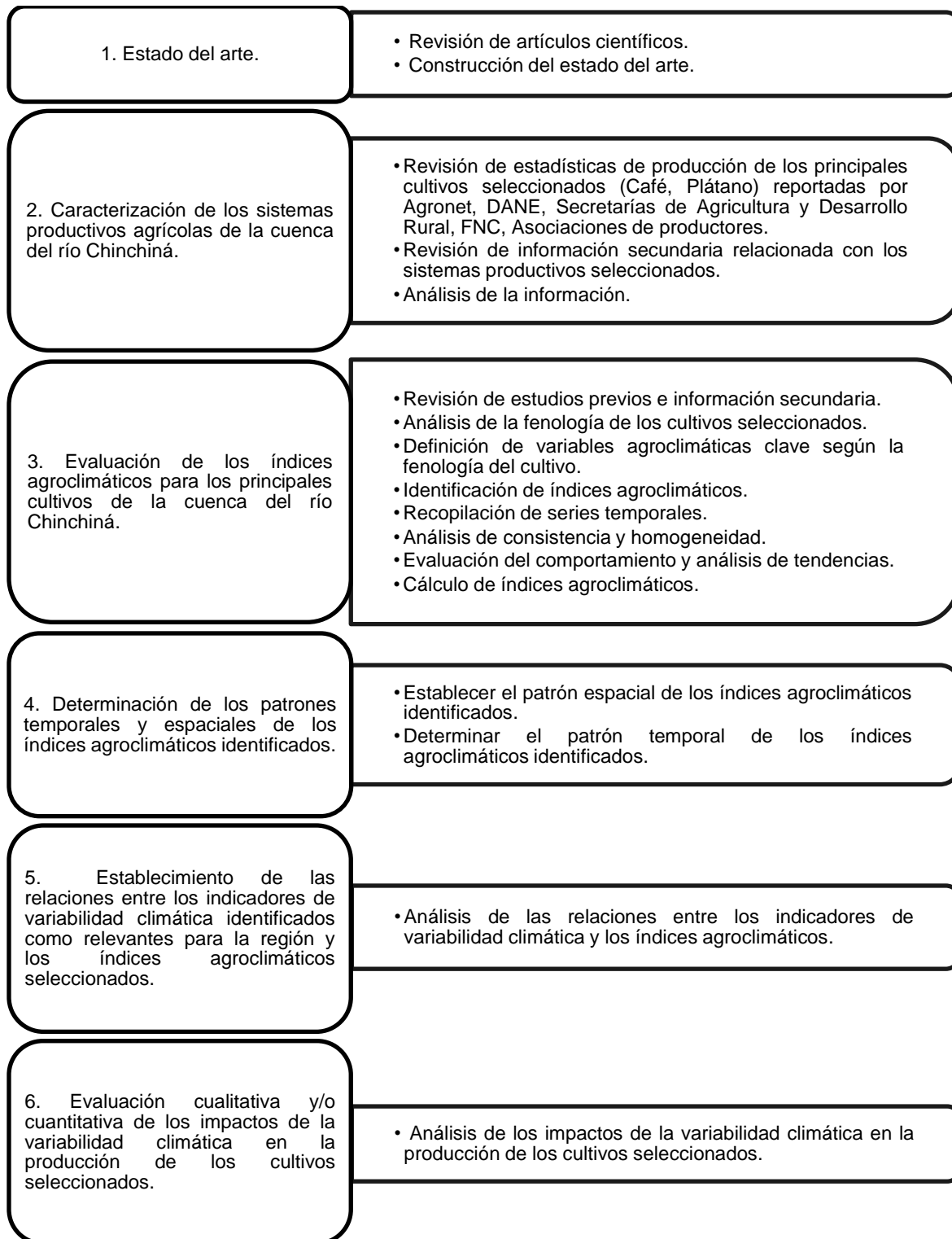
2.4.7 Índice estandarizado de precipitación (SPI por sus siglas en inglés)

Estima las variaciones en la precipitación a escala multi-temporal, y asume que el déficit de precipitación afecta la recarga de agua en acuíferos y nacimientos, al igual que la humedad del suelo y se calcula a partir de información histórica de precipitación (Ramírez et al., 2010), lo cual lo convierte en una potente herramienta fácil de usar para determinar los diferentes periodos de sequías o excesos de humedad. Es un índice normalizado permitiendo coherencia espacial y comparaciones entre regiones con climas variados (OMM, 2012b).

3. Metodología

A continuación, se explica la zona de estudio, la localización de la cuenca del río Chinchiná, su geomorfología y clima. Se expone la metodología utilizada para la recopilación, procesamiento de la información y análisis estadístico. También se presentan los métodos para la estimación de los índices agroclimáticos, de las correlaciones, del análisis temporal, espacial y con el ENSO de cada una de las variables e índices. Finalmente se presentan los cultivos seleccionados y una descripción de cada uno.

En la **Figura 3-1** se describe la metodología utilizada para el desarrollo de los objetivos de la investigación.

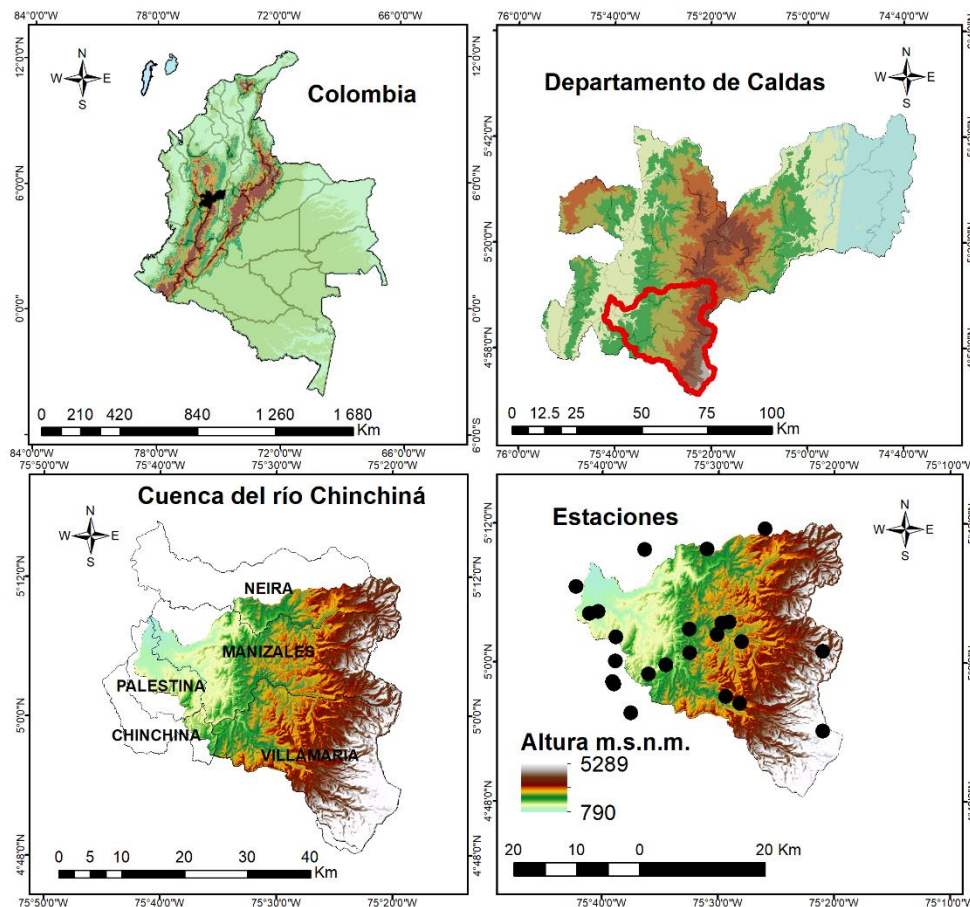
Figura 3-1: Descripción metodológica.

3.1 Zona de estudio

3.1.1 Localización

La cuenca del río Chinchiná se encuentra localizada en la región centro sur del departamento de Caldas, Colombia, con coordenadas Latitud (N) 4°48' a 5°12' y Longitud (W) 75°19' a 75°42'. Su extensión va desde el Nevado del Ruiz, donde nacen los ríos Guacaica, Chinchiná y Rioclaro, a 5289 m.s.n.m., hasta la desembocadura en el río Cauca a 804 m.s.n.m, con una extensión total de 1052.25 km² (Ocampo et al, 2014; CORPOCALDAS et al, 2015). En la **Figura 3-2** se puede apreciar la diferencia altitudinal en toda la cuenca del río Chinchiná y su respectiva localización.

Figura 3-2: Localización de la cuenca del río Chinchiná.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 3-3** se presenta la distribución de los suelos y coberturas agrícolas en la cuenca del río Chinchiná, en donde entre los principales cultivos de la región se destacan el café (color verde claro), seguido por el plátano, como importantes áreas sembradas y de cosecha, frente a otro tipo de cultivos de acuerdo a las Evaluaciones Agropecuarias Municipales 2013.

Figura 3-3: Diferentes tipos de suelos y coberturas agrícolas en la cuenca del río Chinchiná.



Fuente: Informe VACEA, 2016.

Teniendo en cuenta que para un mismo cultivo existen diferentes variedades, el análisis se hará de manera general y no se concentrará sobre un tipo de especie específico. También la selección de los cultivos dependerá en gran parte de la información que se tenga disponible para poder realizar la investigación de manera adecuada.

3.1.2 Geomorfología en la cuenca del río Chinchiná

Al encontrarse ubicada en las inmediaciones de la cordillera de los andes, la cuenca del río Chinchiná presenta altas pendientes y lecho rocoso, lo que ocasiona el riesgo de deslizamientos (CORPOCALDAS, 2005; Ocampo, 2012). Posee numerosos afluentes, los dos más importantes son: el río Guacaica con una densidad de drenaje de 0.56 km/km^2 y Rioclaro con 0.67 km/km^2 , mientras su río principal, el río Chinchiná, tiene una densidad de drenaje de 0.61 km/km^2 . Según lo anterior, la cuenca presenta un drenaje pobre o poco eficiente (Monsalve, 2004; Ocampo, 2012).

Otra característica hídrica, la densidad de corriente, permite conocer las condiciones climáticas y litológicas de la región. Los valores son: para el río Chinchiná de 0.31, el río Guacaica de 0.3 y Rioclaro de 0.31 (CORPOCALDAS, 2013); al ser menores a 5 km/km^2 permiten tener una idea sobre un régimen de precipitaciones escaso o de alta resistencia del material litológico, traduciéndose en un posible escenario de erosiones poco relevantes (Breña et al., 2006).

En el análisis morfométrico, el Coeficiente de Compacidad indica como es el comportamiento de la cuenca ante un evento de lluvia, valores de 1.61 (río Chinchiná), 1.8 (río Guacaica) y 1.65 (Rioclaro) proponen que la cuenca posee una forma entre oval-oblonga y rectangular-oblonga, con probabilidad de dar respuesta intermedia a una lluvia uniforme (Marín, 2017), y de presentarse avenidas más intensas y fuertes (Campos, 1992; Viramontes et al., 2007).

Con una pendiente media de 36.18% en la cuenca, indica que se trata de un terreno fuerte, accidentado y escarpado, siguiendo la clasificación de relieve de Heras (Saavedra, 2001; Viramontes et al., 2007). En cuanto a la relación de elongación, definida como la relación entre el diámetro de un círculo que tenga la misma área y longitud máxima de la cuenca (Breña et al., 2006), se infiere que se trata de un relieve pronunciado (Summerfield, 1991).

El tiempo de concentración de la cuenca, definido como el tiempo que tarda una gota de agua en viajar a partir del punto más lejano de la cuenca hasta su desembocadura, es de aproximadamente 30 horas (Ocampo, 2012).

En la **Tabla 3-1** se presentan los principales parámetros fisiográficos y morfométricos de la cuenca del río Chinchiná.

Tabla 3-1: Parámetros fisiográficos y morfométricos de la cuenca del río Chinchiná y principales subcuencas.

Parámetro	Unidades	Cuenca río Chinchiná	Subcuencas	
			Río Guacaica	Rioclaro
Área	km ²	1052.25	337.81	244.58
Perímetro	Km	184.35	117.57	91.26
Longitud cuenca	Km	49.72	38.64	29.31
Longitud cauce	Km	77.58	52.67	36.87
Índice de forma	-	0.42	0.23	0.28
Coeficiente de compacidad	-	1.61	1.8	1.65
Coeficiente de asimetría	-	1.01	1.24	1.63
Índice de alargamiento	-	1.03	2.61	1.86
Relación de elongación	-	0.73	0.54	0.6
Pendiente media	%	36.18	37.38	40.28
Altitud mínima	m.s.n.m.	804	872	1390
Altitud máxima	m.s.n.m.	5289	3882	5289
Altitud media	m.s.n.m.	2482	2398	3282

Fuente: Adaptado (COORPOCALDAS, 2013; Marín, 2017).

La cuenca del río Chinchiná presenta características geológicas que insinúan una constitución de las vertientes de las montañas por rocas de origen ígneo y metamórfico, cubiertos por un manto de gran extensión de material piroclástico y depósitos de cenizas volcánicas y lapilli (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004; Duque et al., 2009; Ocampo et al., 2014; Marín, 2017). La región conserva un gran número de unidades geológicas de

diferentes características, como producto de la actividad volcánica histórica y por su localización en zona de cordillera, destacándose el complejo Cajamarca (formación más antigua), Complejo Quebradagrande, Unidad de Flujos Volcanoclásticos (conocidos comúnmente como Formación Manizales y Formación Casabianca), Depósitos de Caída Piroclástica y Depósitos recientes (INGEOMINAS, 1993; Alcaldía de Manizales, 2003; Duque, 2013; Ocampo et al, 2014; Marín, 2017).

Se destaca la gran variedad de texturas de los suelos en la cuenca, debido a las altas pendientes y cantidad de materiales diferentes, notándose cambios bruscos en cortas distancias (Ocampo et al., 2014). La cuenca posee suelos jóvenes, con cubierta piroclástica y presencia de depósitos de origen fluvial a lo largo de su red de drenaje. Los suelos residuales, provenientes de cenizas volcánicas, son los predominantes en la formación superficial del terreno (Alcaldía de Manizales, 2003).

Es de recalcar que la agricultura es la predominante en cuanto a uso y cobertura del suelo en la cuenca, sin embargo, dadas sus diferentes características morfométricas y diversidad de pisos térmicos, sus usos pueden ser muy variados. Sobresalen los cultivos de café, particularmente en la cuenca media y baja (Ocampo et al., 2014).

3.1.3 Clima en la cuenca del río Chinchiná

En la cuenca del río Chinchiná se presenta un clima bimodal, derivado del movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical - ZCIT sobre la región andina colombiana, presentando incremento en las precipitaciones durante los meses marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre (Poveda et al., 2014). Se tienen altas precipitaciones, alrededor de 2000 y 2200 mm/año, estas son mayores que la media mundial (900 mm/año), suramericana (1600 mm/año) y menores que la media nacional (3000 mm/año) (Ocampo, 2012).

Dentro de la afectación del clima en la cuenca se presentan fenómenos macroclimáticos como la circulación atmosférica del Pacífico, la corriente del chorro del Chocó, los aportes de humedad procedentes del Amazonas, los vientos Alisios que ingresan por el Atlántico y la presencia de los tres ramales de la cordillera de los Andes (CORPOCALDAS et al., 2015; Jaramillo, 2005).

El principal modo de variabilidad climática interanual que afecta la cuenca es el ENSO en sus dos fases: El Niño (Episodios cálidos) y La Niña (episodios fríos) (Ocampo et al., 2014).

La temperatura y la precipitación son unas de las principales variables que permiten definir el clima de una zona. Adicionalmente, el análisis de la humedad relativa, el viento y el brillo solar también ayudan a determinar las características climáticas.

En cuanto a temperatura, en la cuenca se presenta un comportamiento bimodal con valores mayores durante los meses diciembre-enero-febrero y junio-julio-agosto. Se tienen todos los pisos térmicos en la cuenca a causa de su marcado gradiente altitudinal con variaciones desde los 5289 m.s.n.m. en la región del parque Nacional Natural Los

Nevados, hasta los 804 m.s.n.m. en la desembocadura del río Chinchiná sobre el río Cauca.

Se presentan dos periodos de exceso de humedad en los meses de marzo a junio y septiembre a diciembre, mientras en todos los otros meses los períodos presentan menor humedad (CORPOCALDAS et al., 2015). Según el mapa de humedad relativa media anual del IDEAM, existen fluctuaciones entre 85-90% en la parte alta de la cuenca y de 75-85% en la parte media-baja (IDEAM, 2005a).

El brillo solar muestra una relación inversamente proporcional a la altitud. En la cuenca alta del río Chinchiná, se presentan los menores valores mensuales de brillo solar, aumentando progresivamente a medida que la elevación disminuye (Ocampo, 2012).

Según el Atlas de Radiación Solar de Colombia (IDEAM, 2005b), en la zona se presentan variaciones en la radiación solar entre 4-5 Kw-H/m² con una distribución bimodal con menores valores en los períodos lluviosos y mayores en los secos.

3.2 Recopilación y procesamiento de la información

La información climatológica necesaria para el cálculo de las correlaciones y los análisis de esta investigación se obtuvo a partir de las estaciones pertenecientes a la red de monitoreo meteorológico del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales - IDEAM, el Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFÉ y la Central Hidroeléctrica de Caldas – CHEC. Estas estaciones corresponden a las empleadas en el desarrollo del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Chinchiná (CORPOCALDAS et al., 2015), e información digitalizada a partir de anuarios de CENICAFÉ encontrados en la Universidad Autónoma de Manizales y en el IDEA de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Se seleccionaron la mayoría de estaciones con un periodo de registro homogéneo de 30 años según las recomendaciones de la OMM (2008), cantidad mínima de datos para conocer adecuadamente el comportamiento temporal de cada variable, variaciones, tendencias y estadísticas, especialmente en periodos donde se presenta El Niño y La Niña. Adicionalmente se encuentran distribuidas a lo largo de la zona de estudio para realizar un apropiado análisis espacial.

En cada una de las variables se comprobó su consistencia y homogeneidad, verificando que los datos faltantes fueran inferiores a 10%, sólo una excepción se tuvo en cuenta en la parte alta de la cuenca ya que la información es escasa, la estación Las Brisas con un porcentaje de datos faltantes del 18%, esta estación es necesaria para conocer el comportamiento de la variabilidad climática en la parte del páramo ya que posee registros superiores a 30 años. De acuerdo a lo anterior el número total de estaciones seleccionadas es de 23, las cuales cuentan con un periodo de registro común desde el año 1981 hasta el 2010. En la **Tabla 3-2** se muestra el listado de estaciones escogidas con sus coordenadas y elevación.

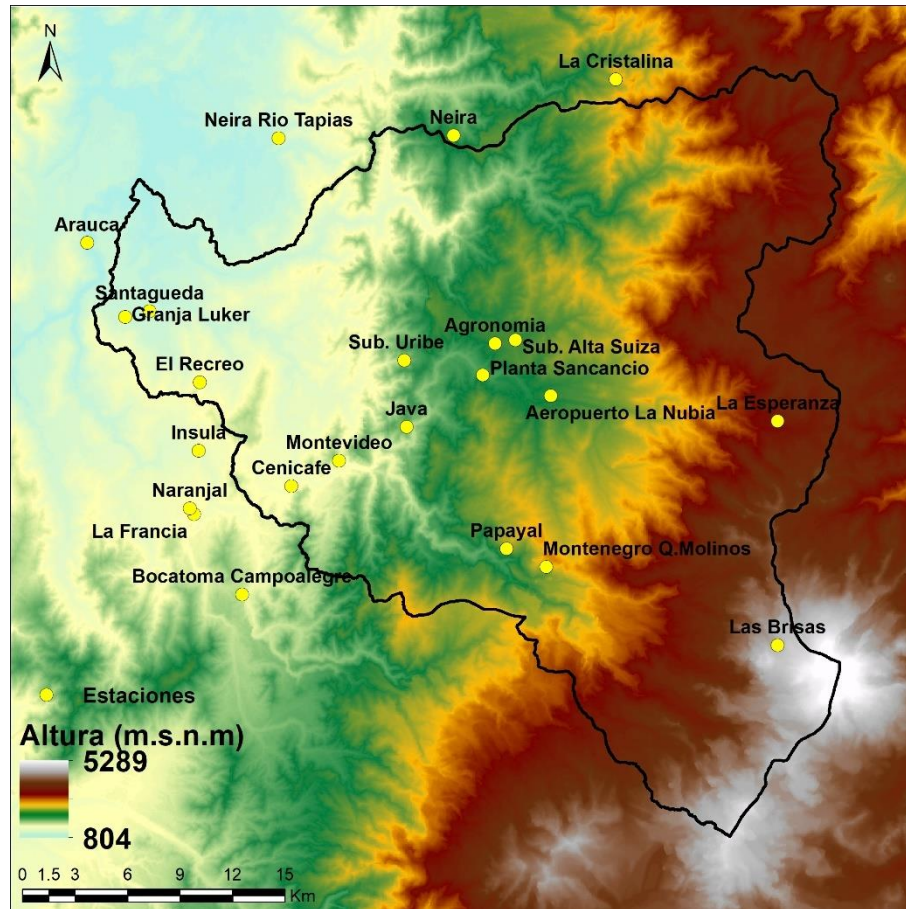
Tabla 3-2: Estaciones evaluadas para el estudio en la cuenca del río Chinchiná.

Estación	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación (m.s.n.m.)
Aeropuerto La Nubia	5°1'47"	75°28'0"	2058
Agronomía	5°3'24"	75°29'43"	2088
Arauca	5°6'30.7"	75°42'5.8"	890
Bocatoma Campoalegre	4°55'39"	75°37'32"	1470
Cenicafé	5°0'0"	75°36'0"	1310
El Recreo	5°2'12"	75°38'50"	1430
Granja Luker	5°4'13"	75°41'8"	1031
Insula	5°0.096'	75°38.859'	1225
Java	5°0'50"	75°32'27"	1778
La Cristalina	5°11'33"	75°26'0"	2290
La Esperanza	5°1'5.4"	75°21'22"	3280
La Francia	4°58'8"	75°39'0"	1335
Las Brisas	4°54'5.3"	75°21'0"	4150
Montenegro Q. Molinos	4°55'90.5"	75°28'8.3"	2292
Montevideo	4°59.78'	75°34.53'	1370
Naranjal	4°58'19"	75°39'8"	1381
Neira	5°9'49"	75°31'0"	1860
Neira Río Tapias	5°9'44"	75°36'24"	1902
Papayal	4°57'44"	75°29'22"	2220
Planta Sancancio	5°2'25.59"	75°30'5.9"	1850
Santágueda	5°4'24"	75°40'23"	1026
Subestación Alta Suiza	5°3'31"	75°29'5"	2055
Subestación Uribe	5°2'95"	75°31'91"	1905

Todas las estaciones cuentan con registros de precipitación y 7 presentan datos de temperatura, humedad relativa y brillo solar, estas últimas son Agronomía, Aeropuerto La Nubia, Cenicafé, Granja Luker, Las Brisas, Naranjal y Santágueda.

En la **Figura 3-4** se ilustran todas las estaciones seleccionadas dentro de la investigación en su correspondiente localización. La mayoría se encuentran dentro de la cuenca, sin embargo, se seleccionaron algunas cercanas para obtener así una mejor cantidad de datos y disminuir los errores.

Figura 3-4: Localización de las estaciones en la cuenca del río Chinchiná.



Fuente: elaboración propia.

La información referente a los índices climáticos, se tomó a partir de la página web del centro de predicción del clima (CPC) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) del Departamento de Comercio de los Estados Unidos.

Análisis estadístico de la información

Antes de realizar los análisis de las series temporales, fue necesario determinar su calidad, ya que de esta depende el grado de confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto hizo necesario determinar mediante un análisis estadístico la información de precipitación, temperatura, brillo solar y humedad relativa de las estaciones seleccionadas para el estudio.

El análisis estadístico de las series consistió en verificar su homogeneidad y consistencia, y también mediante un análisis de estadística descriptiva, la estimación de estadísticos básicos que permitieron comprender las principales características de los datos y un análisis gráfico para verificar visualmente el comportamiento de cada serie. Teniendo estos análisis en cuenta fue posible verificar incoherencias o errores en la información.

3.3 Estimación de los índices agroclimáticos

3.3.1 Tiempo térmico

El tiempo térmico se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo Térmico} = \text{Temperatura Media} - \text{Temperatura Base}$$

Se tomó una temperatura base de 10°C, correspondiente al cultivo de café en Colombia (Ramírez et al., 2010, 2013). Los cálculos se realizaron con información diaria, y al tener el TT diario, se procedió a estimar los promedios y acumulados necesarios para el análisis.

3.3.2 Amplitud térmica

La amplitud térmica se calculó con la siguiente ecuación a partir de información diaria:

$$\text{Amplitud Térmica} = \text{Temperatura Máxima} - \text{Temperatura Mínima}$$

Una vez se obtuvo la AT diaria, se procedió a calcular los promedios mensuales.

3.3.3 Índice de déficit de brillo solar

El índice de déficit de brillo solar se calculó empleando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Déficit de Brillo Solar} = N - \text{Brillo Solar}$$

$$N = \frac{24}{\pi} * ws, \text{ brillo solar astronómico}$$

$$ws = \text{acos}(-\tan(Fi)\tan(Delta)), \text{ ángulo de puesta del sol (radianes)}$$

$$Fi = \text{latitud (radianes)}$$

$$Delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi}{365} * J - 1.39\right), \text{ declinación solar (radianes)}$$

$$J = \text{número del día del año (1 a 365)}$$

3.3.4 Índice de concentración de la precipitación

El índice de concentración de la precipitación se calculó utilizando la ecuación presentada a continuación, y para su análisis se tuvo en cuenta la clasificación de la **Tabla 3-3**. (Valli, 2013).

$$PCI = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} Pi^2}{P^2}$$

Donde, Pi es la precipitación del mes i en mm, P es la precipitación anual en mm.

Tabla 3-3: Clasificación del índice de concentración de la precipitación.

ICP	Clasificación
8,3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente Estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Altamente Estacional
50 - 100	Irregular

Fuente: (Oliver, 1980; Michiels et al., 1996).

3.3.5 Índice de Fournier modificado

Para el cálculo de este índice se usó la fórmula presentada a continuación (Ferro et al., 1999) y para su clasificación se tomaron los criterios de la **Tabla 3-4**.

$$\text{Índice de Fournier Modificado} = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Donde, P_i es la precipitación mensual en mm. P_t es la precipitación total del año en mm.

Tabla 3-4: Clasificación del índice de Fournier modificado.

Clase	IFM	Agresividad
1	< 60	Muy Baja
2	60 – 90	Baja
3	90 – 120	Moderada
4	120 – 160	Alta
5	> 160	Muy Alta

Fuente: (Arnoldus, 1980).

3.3.6 Índice de erosividad

Lo expuesto en la sección 2.4.6 manifiesta la necesidad de los expertos en relacionar el factor R, con otros parámetros más fáciles de estimar u obtener a partir de los registros de pluviómetros que son más frecuentes (Jordán et al., 2000), en consecuencia, surge una relación entre el índice modificado de Fournier y el índice de erosividad de la lluvia, que para la región cafetera de Colombia ha sido calculada por Ramírez (2006) a través de la ecuación:

$$IE = \sum_{i=1}^{12} 38.4IFM + 28.3$$

Donde, IE es el índice de erosividad en $Mj.mm.ha^{-1}$, IFM es el índice de Fournier modificado en mm.

La ecuación presentada por Ramírez (2006) se utilizó para estimar el factor R, donde se encontró una correlación ($r = 0,84$) entre el IFM y el EI30 promedio mensual reportado por Rivera (1990), para 15 años de registro. Se encontró que en un 70% la variación del EI30

es explicada por el IFM mediante un análisis de regresión lineal con un nivel de significancia del 5% (Tafur et al., 2010).

Para su clasificación se tomaron los valores de la **Tabla 3-5**.

Tabla 3-5: Clasificación del índice de erosividad.

Clase	Erosividad (MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación
1	< 1000	Natural
2	1000 - 2500	Muy baja
3	2500 - 5000	Baja
4	5000 – 7500	Moderada
5	7500 - 10000	Alta
6	10000 – 15000	Muy alta
7	15000 – 20000	Severa
8	> 20000	Extremadamente severa

Fuente: (Rivera et al., 1991).

3.3.7 Índice estandarizado de precipitación

El cálculo de este índice se realizó mediante el software SPI_SL_6 (NDMC, 2017), consiste en seleccionar el número de intervalos mensuales que se quieren analizar y el archivo con los datos bajo un formato definido de tres columnas (Año, mes, precipitación), en la cual la precipitación no debe ir en decimales. El cálculo se realizó para 1, 3, 6, 12 y 24 meses en la cuenca del río Chinchiná entre el periodo 1981 – 2010 para verificar las relaciones de este índice con el efecto de variabilidad climática.

Los valores del SPI se pueden observar en la **Tabla 3-6** en donde valores positivos indican mayor precipitación y valores negativos disminución en esta.

Tabla 3-6: Estadísticos de las estaciones seleccionadas.

Valor de SPI	Condición
≥ 2	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
≤ -2	Extremadamente seco

Fuente: Adaptado (OMM, 2012b).

3.4 Estimación de las correlaciones

Para tener una idea clara de las relaciones entre los diferentes índices se emplean los coeficientes de correlación. Estos pueden ser el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de correlación de Spearman (Badii et al., 2014).

Coeficientes de correlación

Es la principal medida de asociación lineal entre dos variables y su valor no depende de las unidades en que se encuentren (Puertas et al., 2008; Ávila et al., 2014). Se encuentra en un rango entre -1 y 1, al ser negativa o positiva indica la dirección de la correlación, es decir, si es negativa al aumentar una variable la otra disminuye, por el contrario, si es positiva las dos variables aumentan o disminuyen al mismo tiempo. Según lo anterior, el signo no define la calidad de la relación, esta se toma teniendo en cuenta que entre más cercano se encuentre el coeficiente en valor absoluto a 1 es mejor la correlación y si es cercana a 0 indica que no existe buena asociación lineal entre las variables. Un coeficiente de correlación de ± 1 significa una relación perfecta entre las variables (Restrepo et al., 2007).

Coeficiente de correlación de Pearson: para su correcto uso es necesario que las variables cuantitativas a correlacionar tengan una distribución normal bivariada (Restrepo et al., 2007). Se define como se muestra en la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{1i} - \bar{X}_1)(X_{2i} - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{1i} - \bar{X}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{2i} - \bar{X}_2)^2}}$$

Coeficiente de correlación de Spearman: no requiere que las variables posean una distribución normal lo que facilita su uso (Martínez et al., 2009; Naranjo, 2016). Se define como se muestra en la siguiente ecuación:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde, D_i es la diferencia entre los rangos correspondientes a la observación i -ésima.

Al analizar las correlaciones se puede determinar el tiempo de respuesta entre las variables climáticas, los índices agroclimáticos y climáticos. Esta respuesta puede ser sincrónica o inmediata, pero también puede estar rezagada por varios periodos (IDEAM, 2009).

Una manera de interpretar los valores del coeficiente de correlación es mediante la escala presentada en la **Tabla 3-7**.

Tabla 3-7: Escala de interpretación del coeficiente de correlación.

0 - 0.25	Escasa o nula
0.26 - 0.50	Débil
0.51 - 0.75	Entre moderada y fuerte
0.76 - 1	Entre fuerte y perfecta

Fuente: Adaptado (Martínez et al., 2009).

Para tener en cuenta cuál de los anteriores coeficientes utilizar al momento de realizar las correlaciones, es necesario realizar pruebas de normalidad a la información de cada estación meteorológica, estas pruebas pueden ser de Kolmogorov-Smirnov o Shapiro-Wilk. La prueba de Kolmogorov-Smirnov se utiliza cuando los datos analizados superan los 50, mientras que Shapiro-Wilk se usa cuando la cantidad de información es menor a 50 datos. Cada prueba maneja la hipótesis nula H_0 : la variable tiene distribución normal. Esta hipótesis se acepta si en el momento de realizar la prueba el nivel de significancia es mayor a 0.05, de lo contrario se rechaza y se entiende que la variable no posee una distribución normal (UB, 2017).

Es importante resaltar que, para el índice de concentración de la precipitación, el índice de Fournier modificado y el índice de erosividad (escala anual), no se realizó el análisis de correlación con los índices climáticos (escala mensual) ya que sus escalas temporales no son iguales y transformarlas en una misma puede generar errores.

3.5 Análisis temporal

Para el análisis temporal se graficaron las series de cada variable climatológica, tomadas a partir de los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca y de cada índice agroclimático, para observar su comportamiento histórico dentro del periodo de tiempo escogido 1981 - 2010.

3.6 Análisis espacial de las variables

El análisis espacial para cada una de las variables se realizó mediante sistemas de información geográfica SIG con el software ArcGIS, empleado para generar los mapas requeridos en la investigación. Se utilizó un modelo de elevación digital DEM con una resolución de tamaño de 30m x 30m. Para cada una de las interpolaciones espaciales se utilizó el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés). De acuerdo con Cortés (2010), este método de interpolación es válido para una densidad de estaciones alta como la que se tiene sobre la cuenca del río Chinchiná, y al no poseer tanta información de detalle como la que requiere el método Kriging, resulta más sencillo desde el punto de vista matemático (Calderón, 2017). Igualmente se tiene en cuenta el modelo de elevación digital de la cuenca para analizar si existen cambios con la altitud.

3.7 Análisis con el ENSO

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de cada una de las variables climáticas, de los índices agroclimáticos y de la clasificación de los años con presencia del ENSO en sus fases El Niño y La Niña, se realizaron comparaciones para cada variable e índice separando la información en años El Niño, La Niña, Neutral, y en algunos casos combinado cuando se presentan en un mismo año la fase El Niño y La Niña. Para determinar las fases del ENSO se utilizó el índice ONI, ya que en el análisis de las correlaciones es el que

presentó mejores resultados, así mismo se tiene en cuenta la metodología usada por la NOAA internacionalmente y adaptada por el IDEAM para Colombia, la cual consiste en establecer a escala mensual la fase del ENSO dependiendo del valor del ONI, valores menores o iguales a -0.5 (La Niña), mayores a +0.5 (El Niño) y entre -0.5 y 0.5 (Neutral), si estos valores se conservan durante 5 meses consecutivos dentro del mismo año por encima de +0.5 o por debajo de -0.5 es clasificado como un año El Niño o La Niña respectivamente.

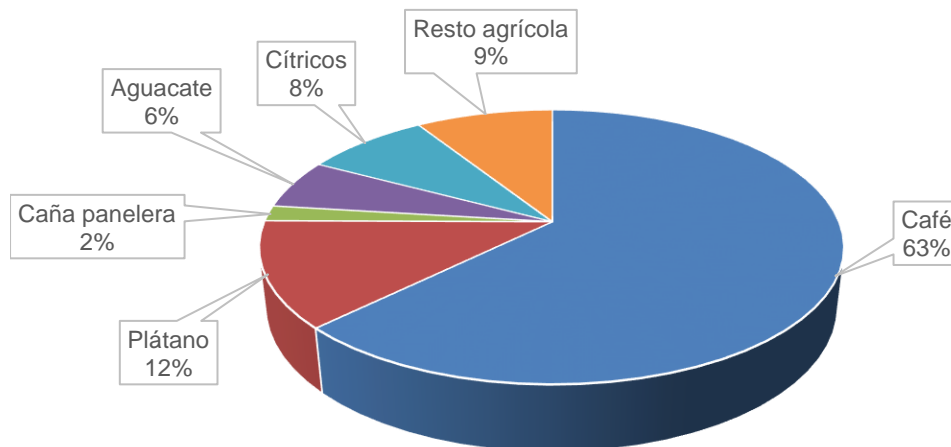
3.8 Impactos de la variabilidad climática en la producción de los principales cultivos

Dado el nivel de información de producción de los cultivos disponible en la cuenca del río Chinchiná, los datos para el análisis de los impactos en la producción de los principales cultivos debido a la variabilidad climática fueron tomados a partir de la información secundaria adquirida y presentada por las diferentes entidades que manejan datos de la agricultura en la región como las Evaluaciones Agropecuarias Municipales, Encuestas Nacionales Agropecuarias, Banco Interamericano de Desarrollo, la Federación Nacional de Cafeteros y la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano - Agronet. Esta información presenta datos de producción de diferentes cultivos como café, plátano y cítricos, para Colombia y Caldas.

Sin embargo, la cantidad de años de información es variable. A nivel nacional para el café se tienen datos mensuales de producción desde 1956 hasta 2017 y para el plátano datos anuales de producción desde 1992 hasta 2016. A nivel de Caldas se presentan datos desde el 2007.

Teniendo esto en cuenta los cultivos seleccionados fueron el café y el plátano, ya que son los de mayor desarrollo en la región como se ilustra en la **Figura 3-5** y sobre los cuales se presentó mejor información.

Figura 3-5: Principales cultivos por área sembrada en el año 2016 en los municipios pertenecientes a la cuenca del río Chinchiná.

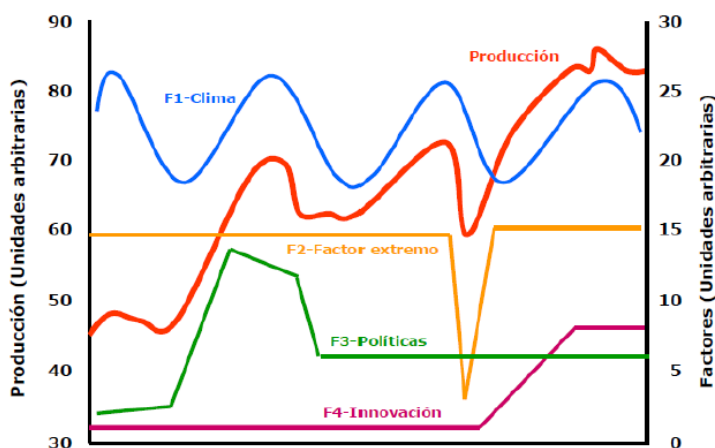


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Agronet.

La producción cafetera de Caldas sigue la misma tendencia que la producción nacional (CRECE, 2005; Ocampo, 2017), teniendo esto en cuenta se realizó el análisis para identificar si en la cuenca del río Chinchiná se tiene la misma relación. La información sobre producción para los cultivos de plátano y café en la cuenca fueron tomados de la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano - Agronet, para los 5 municipios que componen su territorio (Manizales, Chinchiná, Villamaría, Neira y Palestina), esta información se tiene desde el año 2007.

La producción en los cultivos depende de factores como plagas y enfermedades, densidad de siembra, edad del cultivo, condiciones climáticas, fertilización y suelo (Arcila et al., 2007; Ocampo, 2017). Estos factores se muestran en la **Figura 3-6** para el caso del café.

Figura 3-6: Factores que inciden en la producción del café.



Fuente: (Jaramillo, 2011).

En esta investigación solo se trabajó con la variabilidad climática en su componente interanual o ENSO, causante de los mayores desastres en Colombia tanto en su fase fría (La Niña) como en su fase cálida (El Niño).

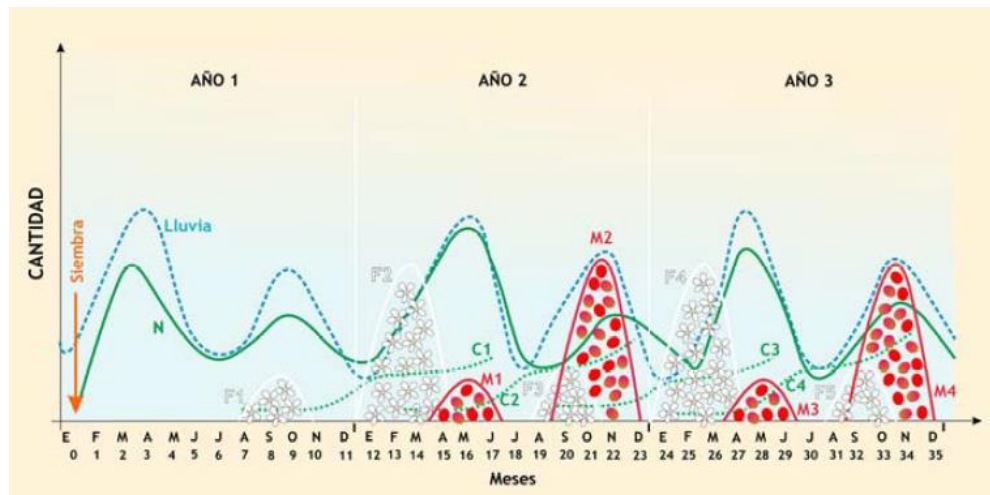
El cultivo de café, se caracteriza por ser un cultivo perenne con un ciclo de vida que puede alcanzar los 25 años. Su crecimiento y desarrollo depende de las condiciones de disponibilidad de agua y energía, ocasionando variaciones dependiendo de las épocas del año (Jaramillo, 2005; Arcila et al., 2007). Una planta de café posee diferentes fases, como la vegetativa, considerada en los cultivos anuales como el tiempo transcurrido desde la germinación hasta la manifestación de la floración. La fase de desarrollo reproductivo, donde aparecen las primeras flores y la fase de senescencia, dada aproximadamente después de los 8 años de edad de la planta y en la que comienza a deteriorarse y bajar su rendimiento productivo (Arcila et al., 2007).

El café es muy sensible cuando se presentan variaciones climáticas extremas, durante los eventos de sequía el fruto no se desarrolla completamente y en las temporadas con altas precipitaciones, se ve afectada su floración y productividad (Turabay et al., 2014).

Ocampo (2017) destaca “En Colombia, las condiciones ambientales necesarias para una apropiada floración del café, especialmente importantes en los trimestres de mayor floración (Feb.-Abr. y Ago.-Oct.) son: un brillo solar diario promedio de 4.8 horas y no mayor de 7.5 horas; entre 60 y 65 días de déficit hídrico moderado (menor de 0.8) o entre 20 a 30 días de déficit hídrico fuerte (menor de 0.5) por trimestre; como mínimo 1100°C de tiempo térmico acumulado por trimestre; menos de 50 días por trimestre con amplitud térmica interior de 10°C (CENICAFÉ, 2010; Jaramillo, 2011; Ocampo, 2016). Según CENICAFÉ, la Temperatura óptima para el desarrollo en Colombia está entre 17 a 23°C (Ocampo, 2016). Con temperaturas mayores a 24°C, la fotosíntesis neta decrece marcadamente, acercándose a cero en 34°C (Nunes et al., 1968; Cannell, 1976). Una temperatura relativamente alta durante la floración podría causar abortición de las flores (ICC, 2009). Por otra parte, con temperaturas por debajo de 18°C el crecimiento se reduce (Camargo, 1985).”

En la **Figura 3-7** se presenta la fenología del café, esta muestra el desarrollo del cultivo durante 3 años, con las épocas de formación de nudos y hojas (N), floración (Fi), crecimiento del fruto (Ci) y maduración del fruto (Mi). También se aprecia la dinámica de las lluvias durante cada fase.

Figura 3-7: Fases de crecimiento del café.



Fuente: (Arcila et al., 2007).

El otro cultivo seleccionado, el de plátano, es el más importante en la zona cafetera central, después del café (Castaño et al., 2012). Se desarrolla principalmente en zonas secas con disponibilidad permanente de agua, ya que este cultivo requiere climas cálidos o semicálidos con temperaturas de 20° a 30°C (Agrosiembra, 2017), humedad constante en el aire, precipitaciones regularmente distribuidas y prolongadas durante todo el ciclo de desarrollo (Ministerio de agricultura, 2014), y por su morfología e hidratación de sus tejidos, es necesario que disponga de abundante cantidad de agua en el suelo para obtener un adecuado crecimiento y desarrollo (Belalcázar, 1991). Estas características se pueden encontrar entre los 1000 y 2000 metros de altura sobre el nivel del mar, correspondiente a la parte media – baja de la cuenca del río Chinchiná.

Su ciclo se divide en dos fases (Stover, 1979; Swennen, 1984): la primera es la fase vegetativa, dada desde el momento en que se siembra la planta y hasta que ocurre la diferenciación floral, y la segunda, la reproductiva, identificada desde la manifestación de la bellota hasta su madurez fisiológica (Aristizábal et al., 2010). Es importante destacar que, durante todo su ciclo de vida, principalmente durante la fase vegetativa, de floración y formación del racimo, el cultivo de plátano es muy sensible a la falta de agua (Doorenbos et al., 1980).

Según Aristizábal et al., (2010), el ciclo fenológico del plátano posee diferentes etapas, estas son: La etapa de brotación y emergencia, considerada desde el inicio de la siembra hasta la aparición de la primera hoja funcional, ocurre la formación de raíces y de hojas no funcionales. La etapa de plántula, desde la aparición de la primera hoja funcional hasta la aparición del primer hijuelo y caracterizada por un crecimiento activo de la planta, aumentando el tamaño del rizoma, el número de raíces y el desarrollo de las hojas. La tercera etapa es la formación de los hijuelos, en donde se genera un gran desarrollo del sistema de raíces, responsable de la obtención de nutrientes. Luego sigue la fase de alargamiento inicial de entrenudos. En esta fase se encuentra marcado el comienzo de la formación del tallo floral. Posteriormente se da comienzo a la iniciación floral y a la etapa de desarrollo de la bellota, seguidas de la floración e iniciación del racimo, momento en el cual se puede dar el comienzo de los frutos. La etapa de llenado del racimo, en la que se acumulan carbohidratos en las gajas, incrementando el tamaño del plátano y con una duración promedio de 120 días. Finalmente, la maduración, evidente por la aparición de una coloración amarilla, la cual puede ocurrir en la planta o cuando ya se encuentra cosechado. En la **Figura 3-8** se pueden observar las diferentes fases de crecimiento del plátano.

Figura 3-8: Fases de crecimiento en plátano *Dominico Hartón*.

Fase	Etapas	Designación	Descripción
V E G E T A T I V A	V0	Brotación y emergencia	Desde el momento de la siembra hasta la aparición de la primera hoja funcional.
	V1	Plántula	Desde la aparición de la primera hoja funcional hasta la aparición del primer hijuelo.
	V2	Formación de hijuelos	Desde la aparición del primer hijuelo hasta el inicio del alargamiento de entrenudos.
	V3	Alargamiento inicial de entrenudos	Desde el alargamiento de los entrenudos nueve o 10, hasta la iniciación de la bellota.
R E P R O D U C T I V A	R4	Iniciación Floral	Desde la iniciación de la bellota hasta que el primordio de ésta se observa a simple vista.
	R5	Desarrollo de la bellota	Desde que el primordio de bellota se observa a simple vista hasta su emisión en la parte terminal del pseudotallo.
	R6	Floración	Desde la emisión de la bellota hasta la apertura de la primera bráctea.
	R7	Iniciación del racimo	Desde la apertura de la primera bráctea hasta que los primordios de todos los dedos se hacen visibles
	R8	Llenado del racimo	Desde que los primordios de dedos se hacen visibles hasta madurez fisiológica
A	R9	Maduración	Desde madurez fisiológica hasta maduración completa

Fuente: (Aristizábal et al., 2010).

4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados, destacando las relaciones entre la variabilidad climática con índices agroclimáticos y variables meteorológicas en la cuenca del río Chinchiná.

4.1 Análisis estadístico de la información

En la **Tabla 4-1** y en la **Tabla 4-2**, se presenta el resumen del análisis estadístico descriptivo con las principales características de cada variable de las estaciones en la zona de estudio, se pueden observar componentes como medidas de distribución (Asimetría y curtosis), que indican la forma cómo se distribuyen los datos respecto a la media y la desviación estándar que mide el grado de dispersión de los valores de acuerdo a esta.

El análisis de consistencia y homogeneidad para cada una de las variables climáticas de las estaciones, permitió validar un comportamiento lineal sin presencia de saltos o tendencias que de alguna forma indiquen alteraciones en la información adquirida, deduciendo así que las series presentan buena calidad y pueden ser empleadas para realizar los cálculos y análisis correspondientes.

En la **Tabla 4-1** se observa como para las variables de temperatura, humedad relativa y brillo solar en las diferentes estaciones no todos los valores de asimetría se encuentran dentro del rango ± 0.5 , esto indica que todas las estaciones que están por fuera de ese rango no se aceptan como simétricas (Webster, 2000). Así como la simetría, la curtosis también tiene en cuenta el rango ± 0.5 , en este caso existen varias estaciones que no cumplen esa condición, esto permite inferir que no presentan una concentración normal de sus datos. De acuerdo con la anterior información, no todas las estaciones presentan una distribución normal.

De la misma manera en la **Tabla 4-2** se puede observar el mismo comportamiento anterior de simetría y curtosis para los valores de precipitación en cada una de las estaciones presentes.

Tabla 4-1: Estadísticos de las estaciones seleccionadas para la temperatura, la humedad relativa y el brillo solar.

Estación	Estadísticos	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Brillo Solar (h)
Agronomía	Media	17.0	79.0	117.6
	Máximo	19.5	91.6	215.9
	Mínimo	15.4	64.6	39.3
	Desviación estándar	0.70	4.77	30.46
	Asimetría	0.63	-0.35	0.34
	Curtosis	0.46	0.13	-0.03
Aeropuerto La Nubia	Media	17.0	83.4	121.8
	Máximo	19.0	92.4	225.3
	Mínimo	14.7	71.5	16.2
	Desviación estándar	0.75	3.96	33.73
	Asimetría	0.00	-0.40	0.13
	Curtosis	-0.07	0.30	0.76
Cenicafé	Media	21.3	78.5	139.0
	Máximo	23.7	86.6	233.5
	Mínimo	19.6	60.5	65.8
	Desviación estándar	0.74	4.55	29.22
	Asimetría	0.50	-0.70	0.40
	Curtosis	0.33	0.40	0.02
Granja Luker	Media	23.0	76.5	161.9
	Máximo	25.0	85.1	240.4
	Mínimo	21.7	58.0	77.7
	Desviación estándar	0.59	4.14	27.41
	Asimetría	0.30	-0.71	0.31
	Curtosis	0.12	1.04	-0.12
Las Brisas	Media	4.6	91.5	69.1
	Máximo	6.3	98.2	165.8
	Mínimo	3.3	75.0	10.6
	Desviación estándar	0.57	4.12	30.00
	Asimetría	0.34	-1.09	0.61
	Curtosis	-0.15	1.80	-0.07
Naranjal	Media	21.1	77.3	140.3
	Máximo	23.3	88.5	237.9
	Mínimo	19.6	56.9	72.5
	Desviación estandar	0.67	5.05	29.35
	Asimetría	0.45	-0.63	0.50
	Curtosis	0.22	0.68	0.09
Santágueda	Media	23.1	73.5	162.2
	Máximo	25.3	83.8	243.9
	Mínimo	20.6	58.1	82.3
	Desviación estandar	0.71	4.93	26.85
	Asimetría	0.13	-0.28	0.18
	Curtosis	0.61	-0.19	0.04

Tabla 4-2: Estadísticos para la precipitación en cada estación.

Precipitación						
Estación	Media	Máx.	Mín.	Desv. S.	Asimetría	Curtosis
Aeropuerto La Nubia	128	356	3	68	0.71	0.41
Agronomía	158	473	5	87	0.62	0.28
Arauca	170	477	0	95	0.24	-0.37
Bocatoma Campoalegre	236	688	7	111	0.54	0.18
Cenicafé	217	591	5	95	0.43	0.38
El Recreo	220	620	8	118	0.60	0.18
Granja Luker	189	534	5	89	0.41	0.09
Ínsula	235	727	0	125	0.74	0.76
Java	165	650	0	91	0.91	1.82
La Cristalina	164	564	5	103	0.86	0.62
La Esperanza	128	325	2	69	0.61	0.02
La Francia	227	628	12	108	0.38	0.32
Las Brisas	121	327	7	63	0.62	-0.02
Montenegro Q. Molinos	162	905	3	121	2.14	7.77
Montevideo	192	625	0	102	0.70	0.93
Naranjal	240	554	19	101	0.38	0.04
Neira	184	582	0	110	0.68	0.47
Neira río Tapias	184	582	0	110	0.69	0.37
Papayal	162	516	0	94	0.93	1.13
Planta Sancancio	160	483	0	91	0.67	0.37
Santágueda	190	434	7	90	0.36	-0.39
Subestación Alta Suiza	152	542	1	85	0.60	0.63
Subestación Uribe	185	716	1	120	1.12	1.72

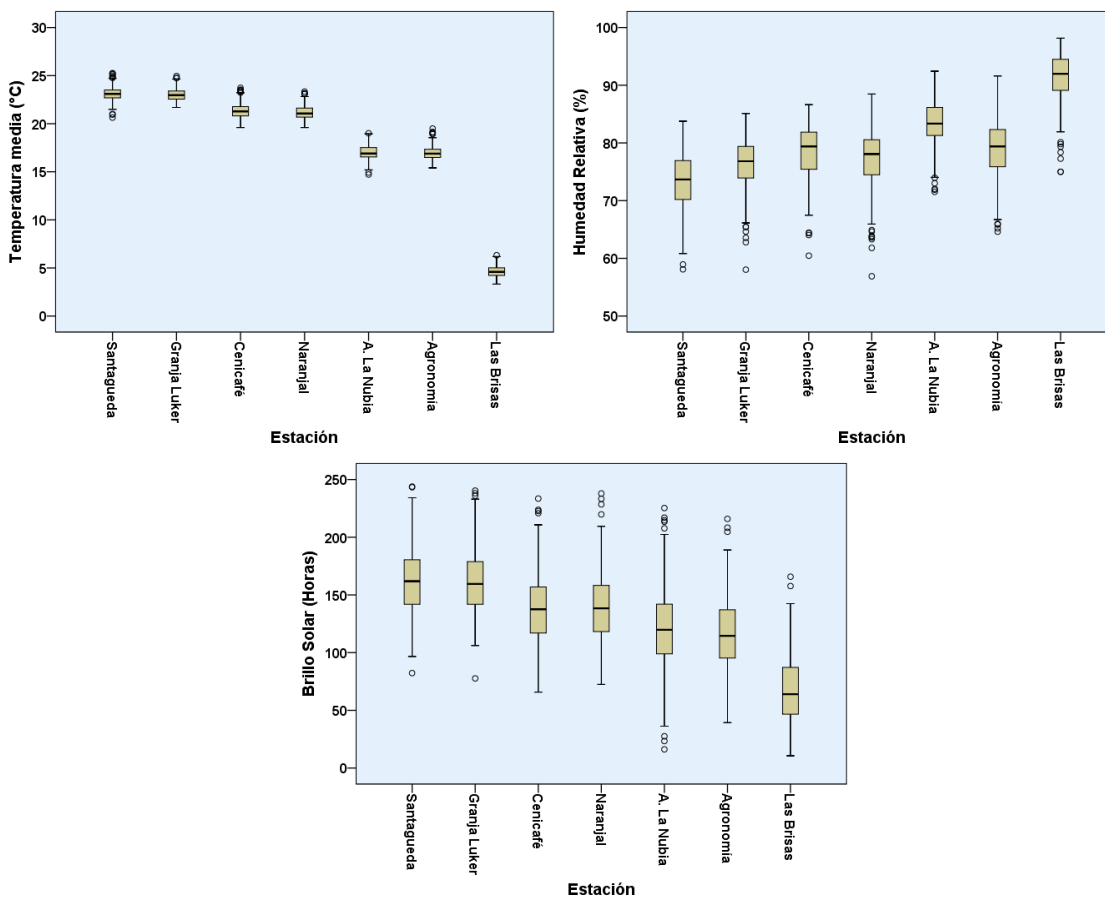
En la **Figura 4-1** y en la **Figura 4-2** se muestran los diagramas de caja que representan visualmente los cuartiles 1 (25%) y 3 (75%) de cada serie. Las series mostraron algunos outliers pero estos son registros que efectivamente fueron tomados en las estaciones, pues son valores que también se presentaron en las estaciones cercanas. Las estaciones se encuentran organizadas de menor a mayor altitud, siendo Santágueda la más baja con una altitud de 1026 m.s.n.m, ubicada en la parte baja de la cuenca del río Chinchiná y Las Brisas la mayor a una altura de 4150 m.s.n.m., ubicada en la parte alta de la cuenca.

En estos diagramas se pueden ver comportamientos similares entre las estaciones que se encuentran cercanas entre sí, como Granja Luker - Santágueda o Cenicafé - Naranjal. Se observan tendencias en cada variable con respecto a la altitud, en general cuando la altura aumenta la temperatura es menor, la humedad relativa aumenta y el brillo solar disminuye.

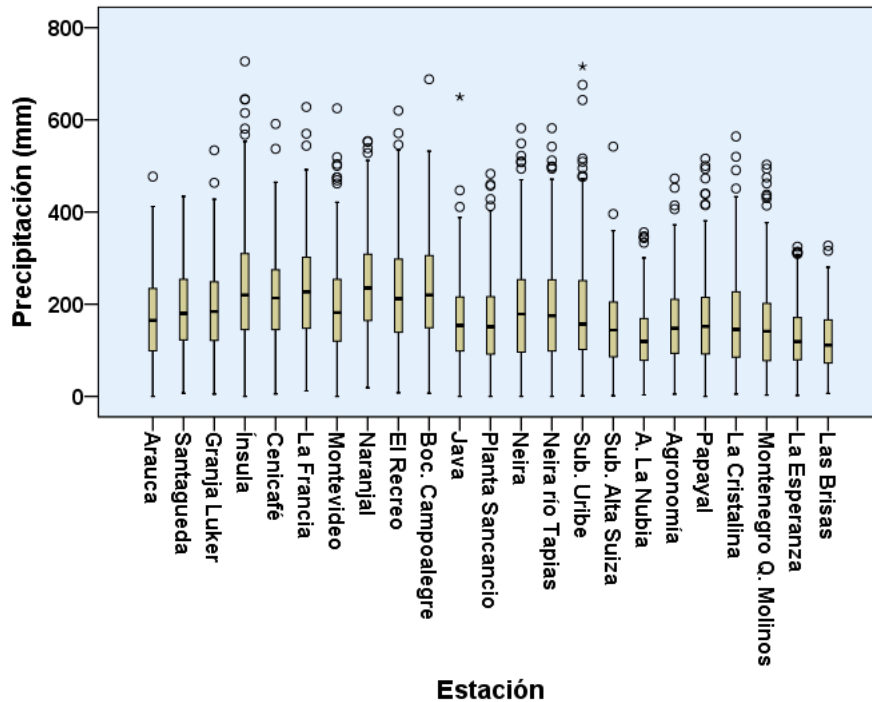
La temperatura media de las estaciones analizadas se encuentra entre 15°C y 25°C a excepción de Las Brisas que tiene un promedio 4.6 con mínimos de 3.3°C y máximos de 6.3°C, por encontrarse en el páramo. También se puede distinguir que los datos en temperatura se encuentran más concentrados, es decir, no presentan mucha variabilidad, caso contrario ocurre con las otras variables.

La humedad relativa promedio en la cuenca generalmente se encuentra entre el 70% y el 90%. Los valores outliers se encuentran ubicados hacia los mínimos, indicando que un bajo porcentaje de humedad relativa en la cuenca no se presenta frecuentemente. Por el contrario, en el brillo solar la mayoría de outliers se ubican hacia los máximos, y sus valores presentan un amplio rango, revelando una alta dispersión en general para todas las estaciones.

Figura 4-1: Diagramas de caja de la temperatura, la humedad relativa y el brillo solar.



En cuanto a la precipitación, se manifiesta una leve tendencia, a medida que aumenta la altura disminuye la lluvia. En general, los valores de precipitación de todas las estaciones se encuentran dentro de un mismo rango, esto lleva a pensar que no se presenta mucha variabilidad entre cada una de ellas. En la mayoría de las estaciones el 50% de los datos se encuentran entre 50 mm y 250 mm mensuales.

Figura 4-2: Diagramas de caja de precipitación.

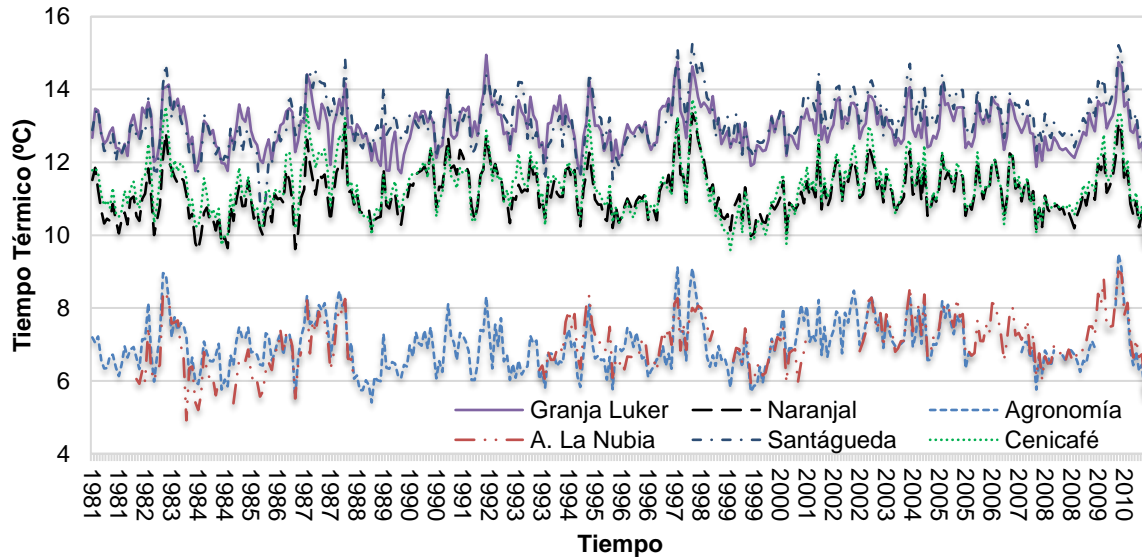
4.2 Estimación de los índices agroclimáticos

En este apartado se evaluaron los índices agroclimáticos: tiempo térmico, amplitud térmica, déficit de brillo solar, índice de erosividad, índice de Fournier modificado, índice de concentración de la precipitación y el índice estandarizado de precipitación. Para esto se consideró el registro histórico entre 1981 - 2010 de las estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná. La estimación de los índices agroclimáticos se realizó para todas las estaciones en base a las formulaciones planteadas en la sección 3.3, los resultados se resumen en las tablas y gráficas presentadas a continuación.

4.2.1 Tiempo térmico

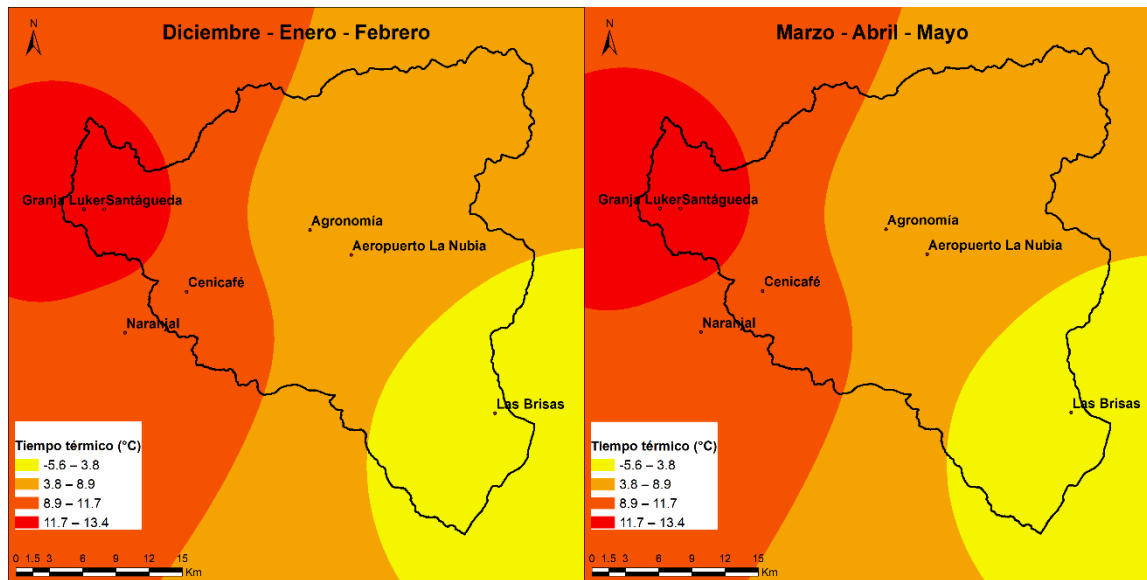
El tiempo térmico en la cuenca del río Chinchiná es similar en las estaciones que se encuentran cerca entre sí, Santaguada - Granja Luker con valores promedio de 13 °C representando la parte baja de la cuenca, Cenicafé – Naranjal presentan una media de 11.2 °C para la parte media-baja, Agronomía y Aeropuerto La Nubia tienen un valor promedio de 7 °C para la parte media, y en la parte alta la estación Las Brisas posee un promedio de -5.4 °C. En la **Figura 4-3** se presenta el comportamiento de todas las estaciones, donde se aprecia que el TT se mantienen dentro de un mismo rango durante todo el periodo de tiempo.

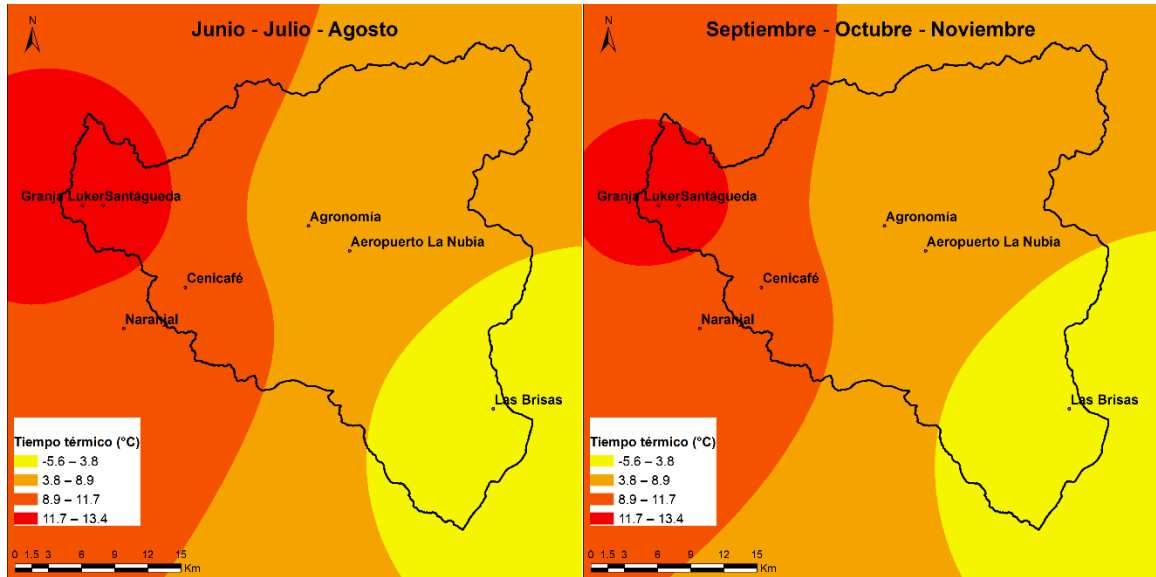
Figura 4-3: Tiempo térmico promedio mensual (1981 - 2010).



En la **Figura 4-4** se presentan las variaciones trimestrales para la cuenca, se muestra como la variación en la altitud tiene relación con el tiempo térmico, ilustrando que entre mayor es la altitud, menor son los grados de calor al día promediados para todos los meses durante el periodo de estudio.

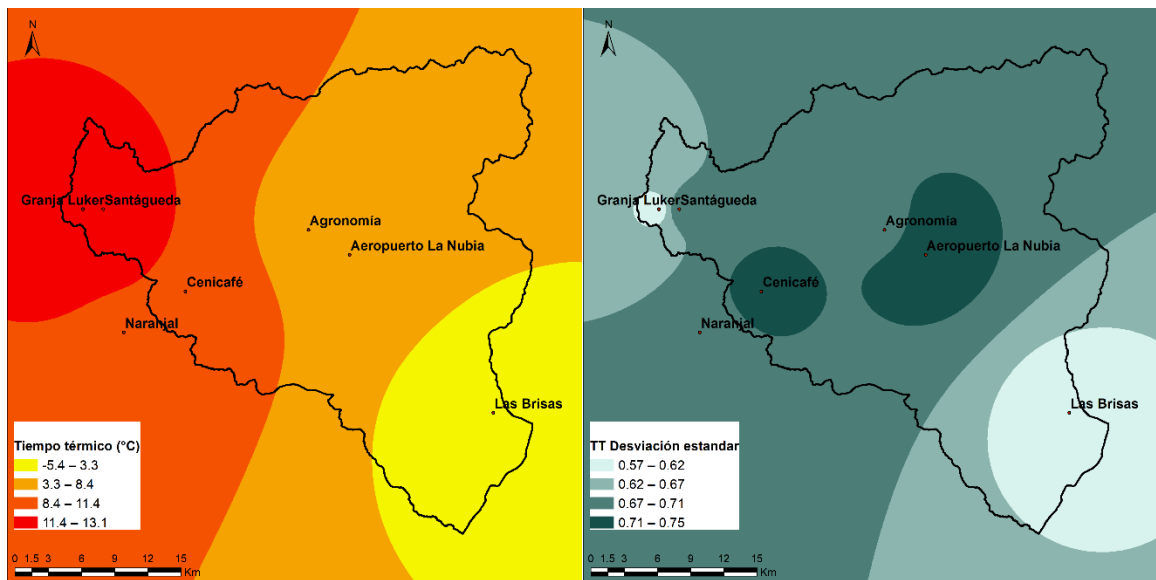
Figura 4-4: Tiempo térmico promedio diario por trimestres (1981 - 2010).





En la **Figura 4-5** se presenta el tiempo térmico promedio diario para la cuenca del río Chinchiná para el periodo 1981 – 2010 y su desviación estándar, mostrando el mismo comportamiento de la clasificación trimestral. Se tienen valores promedio de 12.3°C en la cuenca baja y de -1°C en la cuenca alta.

Figura 4-5: Tiempo térmico promedio diario (1981 – 2010).

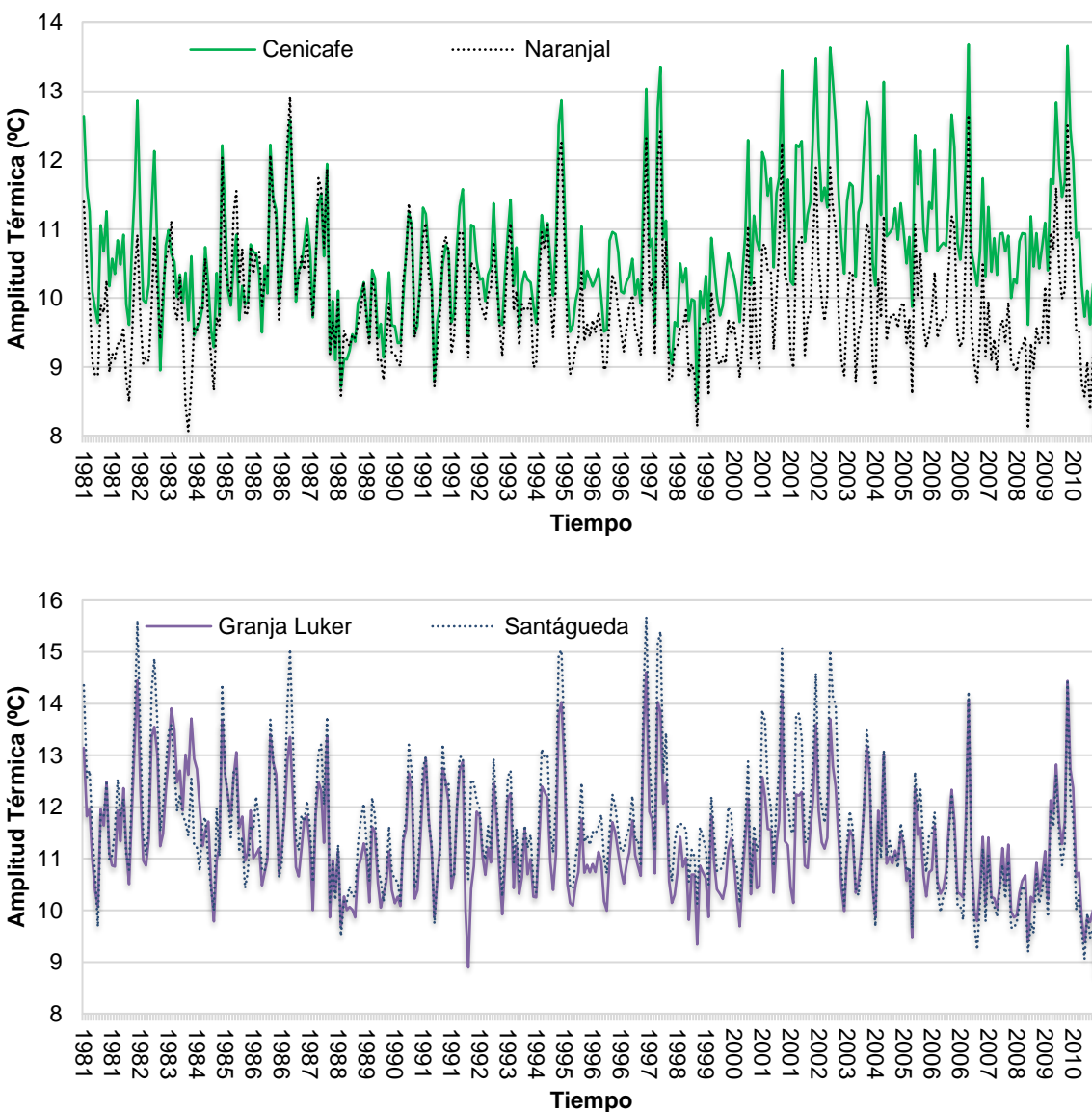


4.2.2 Amplitud térmica

En cada una de las estaciones se realizó el análisis de la amplitud térmica como se presenta en la **Figura 4-6**. Donde se puede observar que la amplitud térmica diaria promedio para todo el registro histórico (1981 - 2010) presenta fluctuaciones, sin embargo, cada estación permanece dentro de un rango fijo a lo largo de toda la serie sin observarse

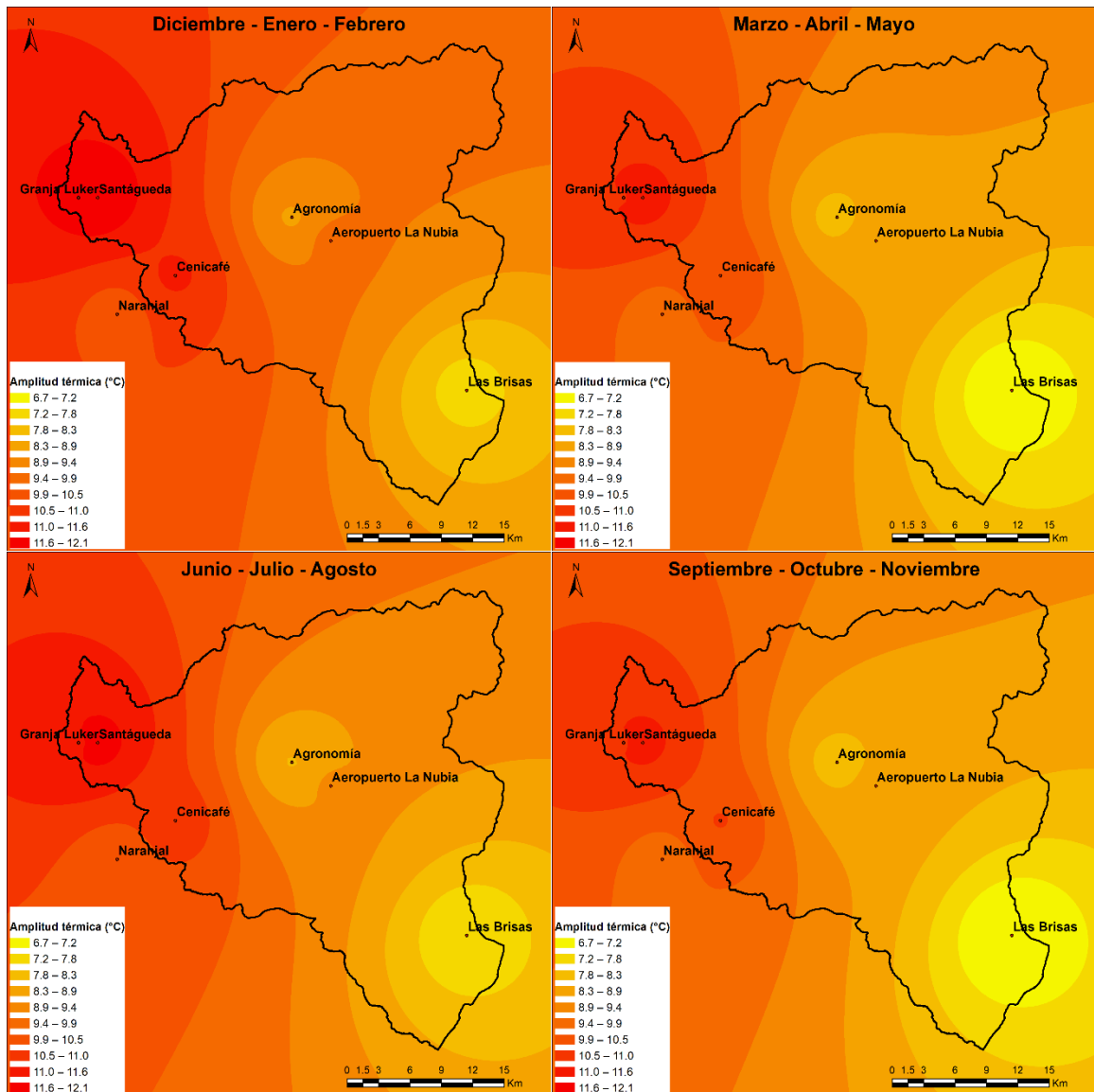
cambios abruptos en la tendencia general de la serie. La AT para todas las estaciones analizadas en la cuenca baja y media se encuentra entre 8°C y 16°C, y conserva la misma tendencia histórica, en la cuenca alta la AT se encuentra entre 5°C y 10°C. Debido a que el índice se basa en temperatura, esta diferencia en grados dentro de la cuenca puede marcar diferencias significativas de clima y de hábitat dentro del territorio. Al igual que en el tiempo térmico, el comportamiento de la amplitud térmica en las estaciones que se encuentran cercanas entre sí, es muy similar una de la otra.

Figura 4-6: Amplitud térmica promedio mensual (1981 - 2010).

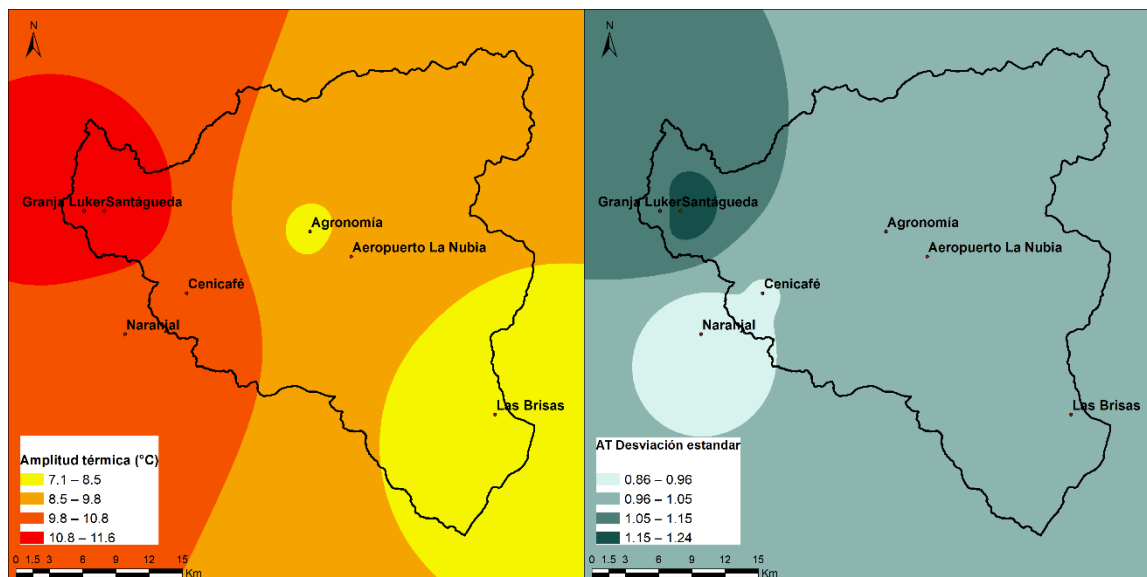


Todas las estaciones muestran un comportamiento similar y al igual que en la cuenca del río Chinchiná la variación de la altitud tiene relación con la amplitud térmica, entre mayor es la altitud menor es la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, ver **Figura 4-7**. Los cambios trimestrales demuestran menor la amplitud térmica en las épocas de mayores lluvias.

Figura 4-7: Amplitud térmica promedio trimestral (1981 - 2010).



En general para la cuenca del río Chinchiná se tienen valores promedio diarios de amplitud térmica de $11.2^{\circ}\text{C} \pm 1.01^{\circ}\text{C}$ en la parte más baja de la cuenca, seguida de $10.3^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en la media-baja, $9.1^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en la media y de $7.8^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en la parte alta, tal como se aprecia en la **Figura 4-8**.

Figura 4-8: Amplitud térmica promedio diario (1981 - 2010).

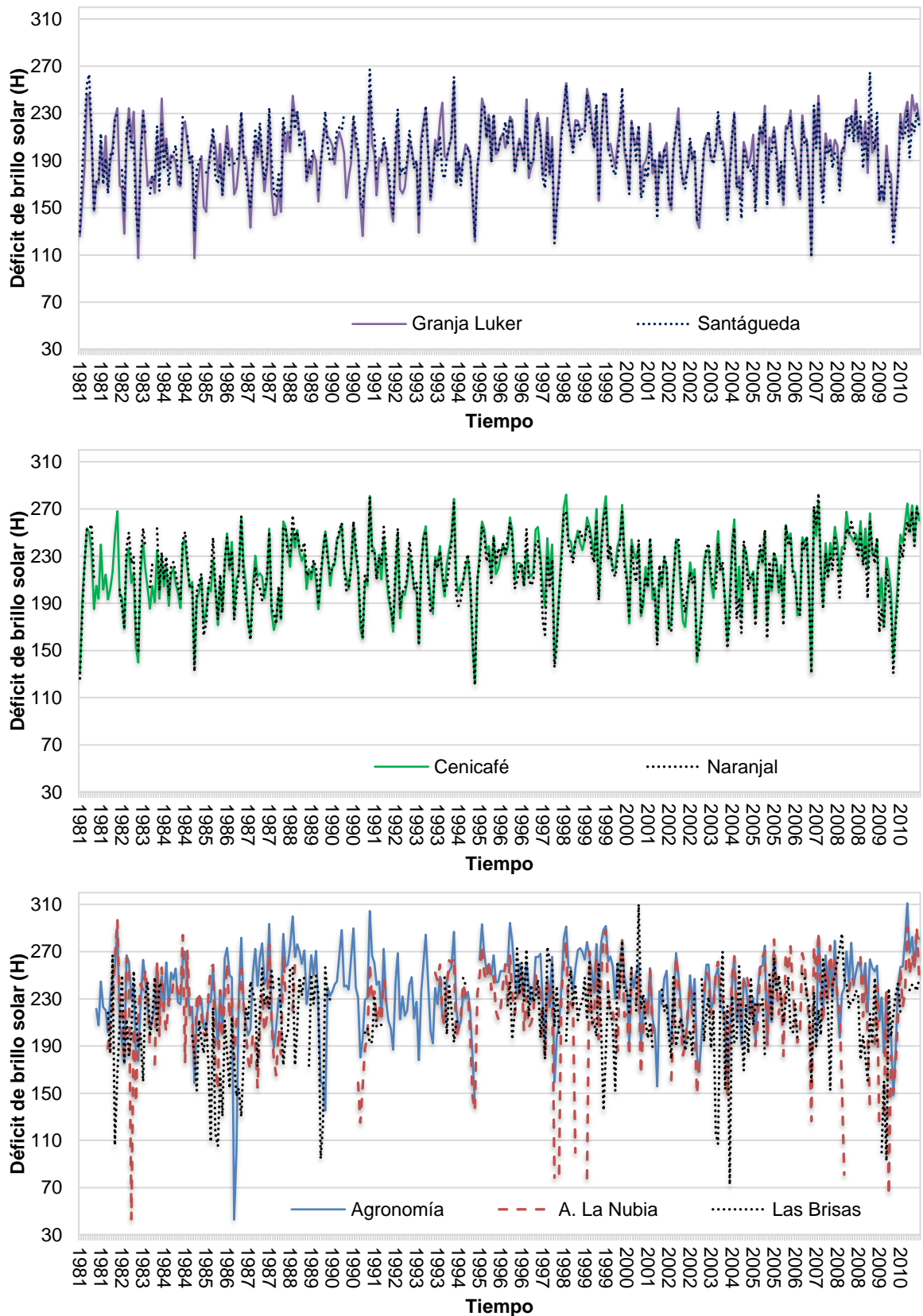
4.2.3 Déficit de brillo solar

El déficit de brillo solar en la cuenca del río Chinchiná durante el periodo comprendido entre 1981 - 2010 se encuentra con extremos de 43 y 311 horas mensuales acumuladas en promedio, con extremos de 0.1 horas diarias (Las Brisas) y 11.8 horas diarias.

En la **Figura 4-9**, se presentan las horas mensuales acumuladas de déficit durante todo el tiempo de estudio. El déficit de brillo solar en todas las estaciones se presenta en promedio entre 150 y 270 horas mensuales, sin embargo, el rango entre los valores mínimo y máximo es muy amplio, mostrando en general una alta dispersión de esta variable.

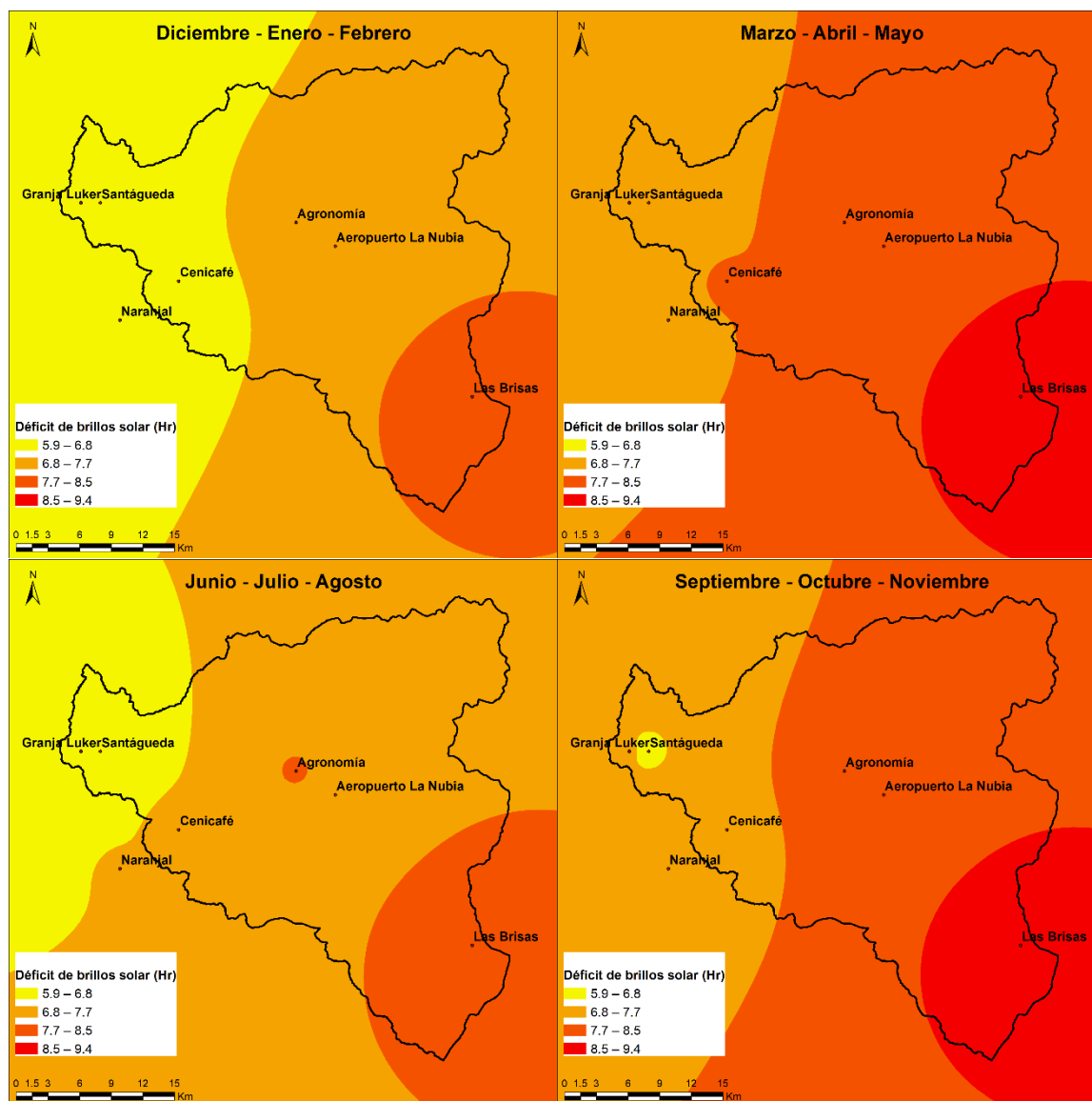
Por otro lado, se observa que las estaciones cercanas tienen un comportamiento similar, Santágueda - Granja Luker, Cenicafé - Naranjal, Agronomía - Aeropuerto La Nubia.

Figura 4-9: Déficit de brillo solar acumulado mensual (1981 - 2010).

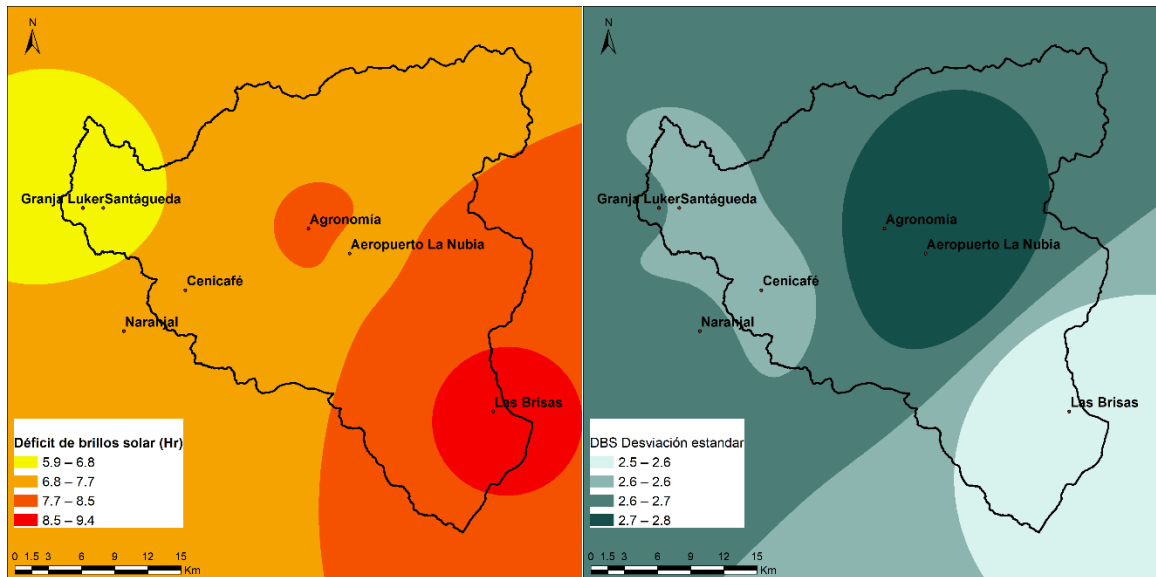


En la **Figura 4-10** se observan las horas de DBS diarias, se pone en evidencia la relación existente entre esta variable y la altitud, siendo mayor cuando se incrementa la elevación. En los meses con más precipitación (marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre) se presenta el mayor DBS, un aumento generalizado para toda la cuenca.

Figura 4-10: Déficit de brillo solar promedio diario por trimestres (1981 - 2010).

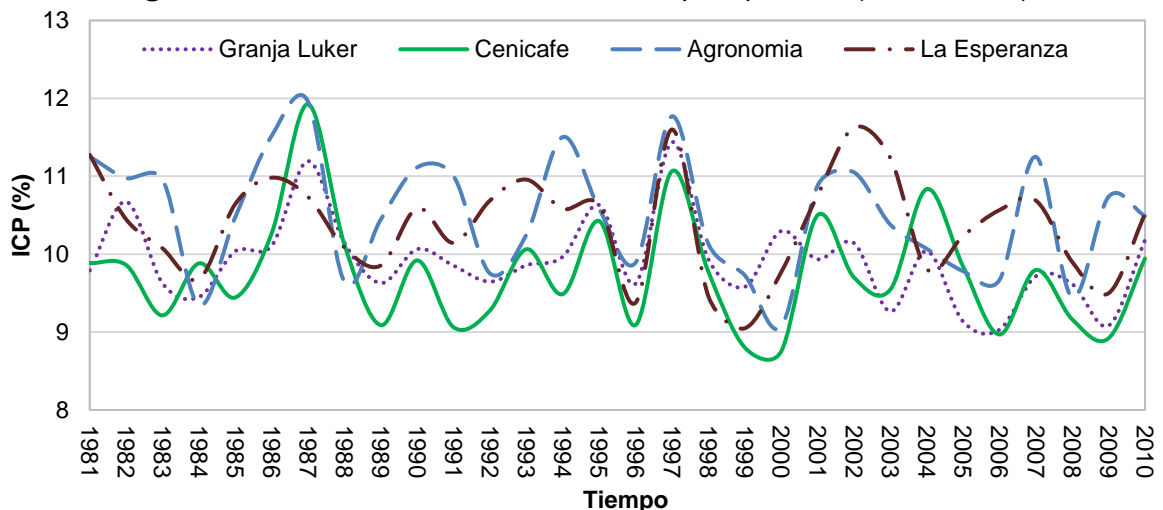


En la **Figura 4-11** se observan las horas promedio de déficit de brillo solar, 6.3 ± 2.55 horas diarias en la parte baja de la cuenca y 8.9 ± 2.75 horas diarias en la parte alta. Es importante resaltar que en la parte media de la cuenca se presentan los valores con mayor desviación estándar.

Figura 4-11: Déficit de brillo solar promedio diario (1981 - 2010).

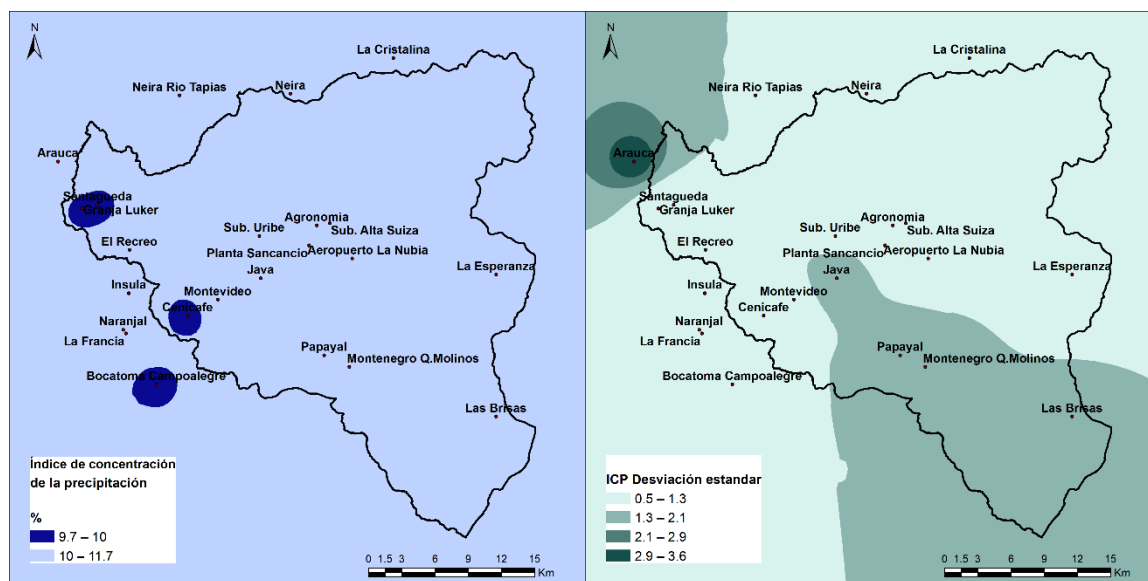
4.2.4 Índice de concentración de la precipitación

En la **Figura 4-12** se presentan los resultados del ICP obtenidos, a medida que se incrementa la altitud el índice también aumenta, indicando que la precipitación en la parte alta de la cuenca es más irregular, esto quiere decir que las precipitaciones tienden a concentrarse en unos solos meses, y a medida que se llega a la cuenca baja la lluvia se comporta de manera más uniforme durante todos los meses del año. Analizando las estaciones, se presentan todos los rangos de clasificación del índice en la cuenca, comportamientos en la precipitación que varían desde uniforme, moderadamente estacional, estacional, altamente estacional hasta irregular. Si no se tiene en cuenta la estación Las Brisas, localizada en el páramo, la clasificación solo llega hasta una distribución estacional de las precipitaciones durante todos los meses del año.

Figura 4-12: Índice de concentración de la precipitación (1981 - 2010).

En la **Figura 4-13** se aprecia como en general para toda la cuenca, el índice de concentración de la precipitación se clasifica como moderadamente estacional, indicando que la lluvia se presenta distribuida a lo largo de todo el año con un aumento en algunos meses, ratificando la tendencia de bimodalidad que se conoce como característica propia de la región.

Figura 4-13: Índice de concentración de la precipitación promedio anual (1981 - 2010).

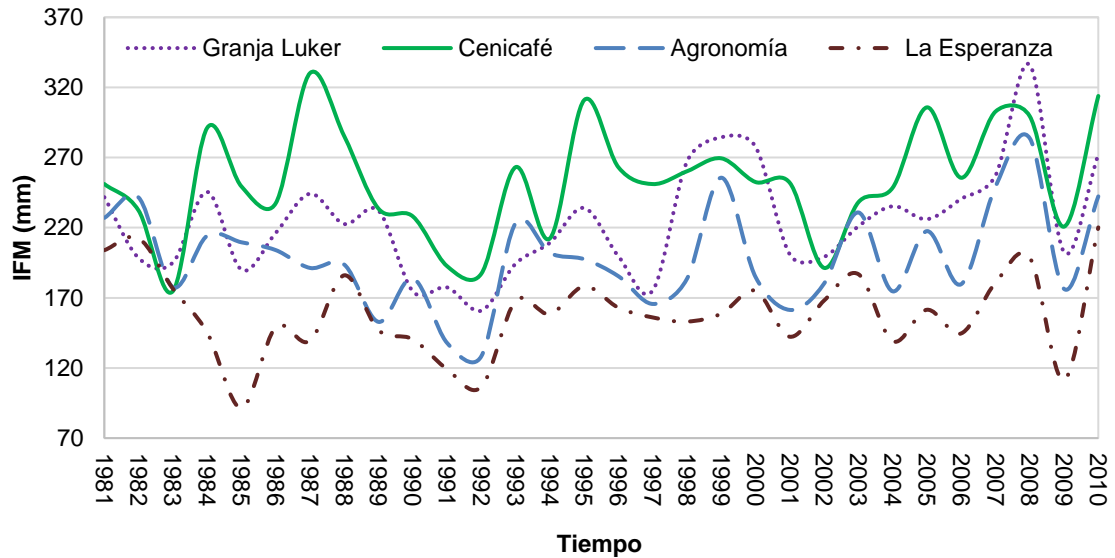


4.2.5 Índice de Fournier Modificado

El índice de Fournier modificado en la cuenca del río Chinchiná presenta variaciones que se encuentran a partir de los 91 mm y hasta 455 mm. Teniendo en cuenta la clasificación obtenida en cada una de las estaciones, se presenta una agresividad de la lluvia baja, moderada, alta y muy alta, lo que se traduce en una capacidad erosiva de la precipitación muy variable.

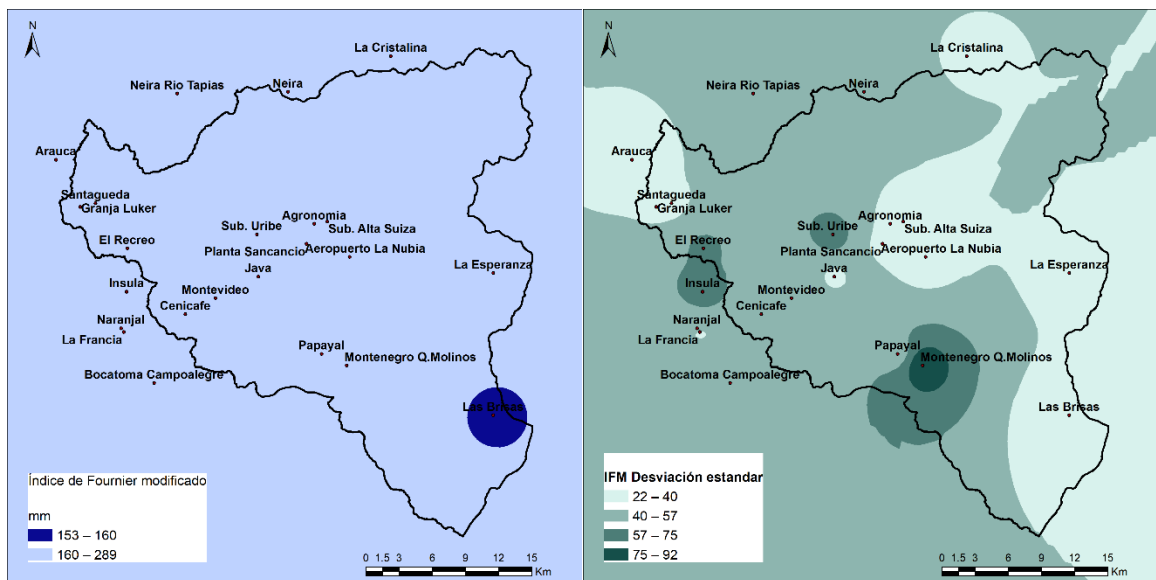
En la **Figura 4-14** se observa el comportamiento de estaciones localizadas en diferentes elevaciones en la cuenca, Granja Luker (1031 m.s.n.m.), Cenicafé (1310 m.s.n.m.), Agronomía (2088 m.s.n.m.) y La Esperanza (3280 m.s.n.m.). A medida que la altura se incrementa el IFM disminuye, esto indica que en la parte alta de la cuenca la lluvia es menos agresiva y en la parte baja es mucho más agresiva, lo que puede generar casos importantes de erosión si no se tienen medidas preventivas.

Figura 4-14: Índice de Fournier modificado (1981 - 2010).



En la **Figura 4-15** se ilustra el IFM promedio para la cuenca del río Chinchiná, al realizar la interpolación de la información, se generaliza la agresividad de la lluvia en toda la cuenca con una clasificación muy alta, con valores mayores a 160 mm y desviaciones variables sobre el territorio, a excepción del sector de Las Brisas donde se considera alta con valores entre 153 a 160 ± 31 mm.

Figura 4-15: Índice de Fournier modificado promedio anual (1981 - 2010).



4.2.6 Índice de erosividad

El índice de erosividad en la cuenca del río Chinchiná demuestra que durante el periodo de tiempo histórico 1981 – 2010, la erosividad de la lluvia se clasifica como baja, moderada,

alta, muy alta y severa con valores que oscilan entre 3633 y 17372 ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}$) si se tiene en cuenta cada estación por separado. Sin embargo, al realizar el análisis promedio e interpolando para toda la cuenca los rangos pasan a ser moderada, alta y muy alta como se aprecia en la **Figura 4-17**. Se observa una relación del índice con la altitud, disminuyendo a medida que la altura aumenta, traduciéndose en que en la cuenca alta, la lluvia presenta menor erosividad y en la cuenca baja, mayor erosividad de los suelos, lo que hace necesario que se implementen acciones de recuperación de los suelos para que no se presenten casos graves de erosividad que puedan afectar los cultivos y la población. En la **Figura 4-16** se ilustran los resultados obtenidos en las estaciones ubicadas en diferentes elevaciones dentro de la cuenca.

Figura 4-16: Índice de erosividad (1981 - 2010).

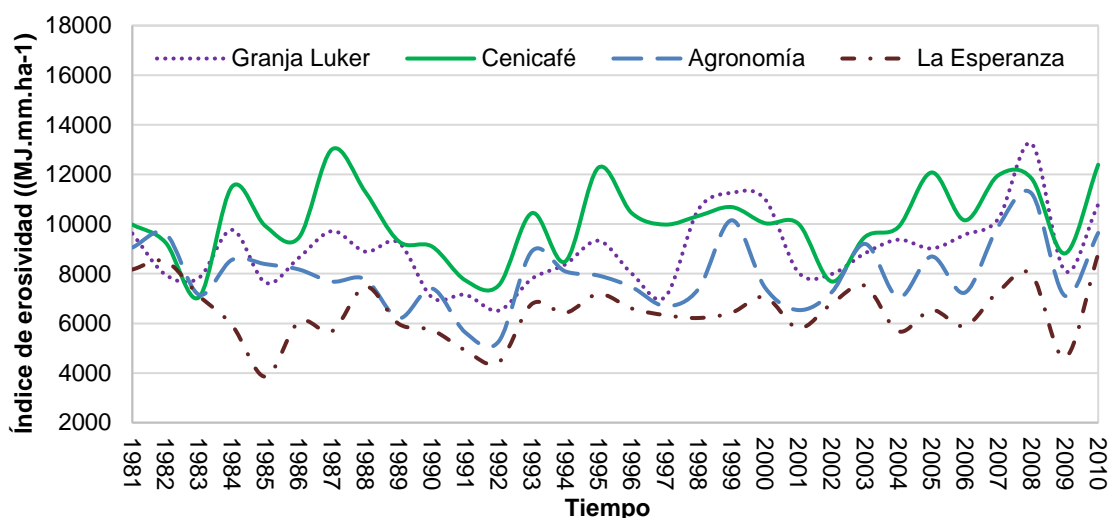
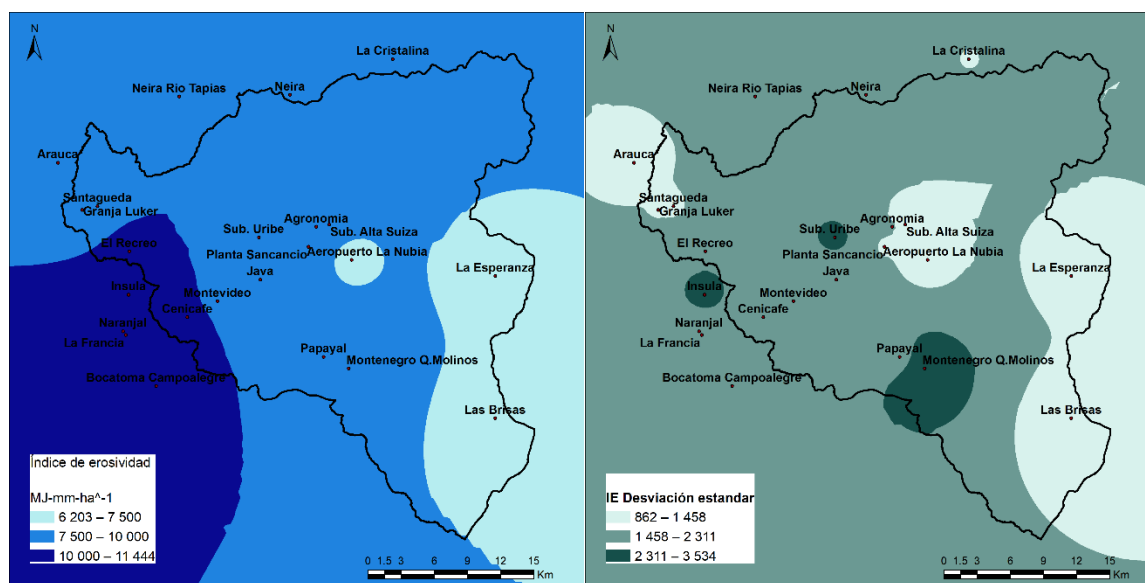


Figura 4-17: Índice de erosividad promedio anual (1981 - 2010).



4.2.7 Índice estandarizado de precipitación

El índice estandarizado de precipitación se calculó para periodos de 1, 3, 6, 12 y 24 meses, los resultados obtenidos se presentan desde la **Figura 4-18** hasta la **Figura 4-22** para la estación Cenicafé. Según las gráficas, a lo largo de la serie histórica entre 1981 – 2010, el comportamiento del SPI indica que tanto las condiciones de sequía y de humedad mantienen un equilibrio, presentándose fluctuaciones constantes entre los periodos secos y húmedos. Se aprecia como en los periodos entre 1986 - 1987 y 1997 - 1998, el índice toma valores menores a -3, manifestándose los extremos de sequía más importantes para la escala temporal seleccionada. Por el contrario, entre los años 1987 – 1988 se presentan valores del SPI mayores a 2, ilustrando el periodo extremadamente húmedo más destacado de la serie.

Figura 4-18: SPI (1 mes), estación Cenicafé (1981 - 2010).

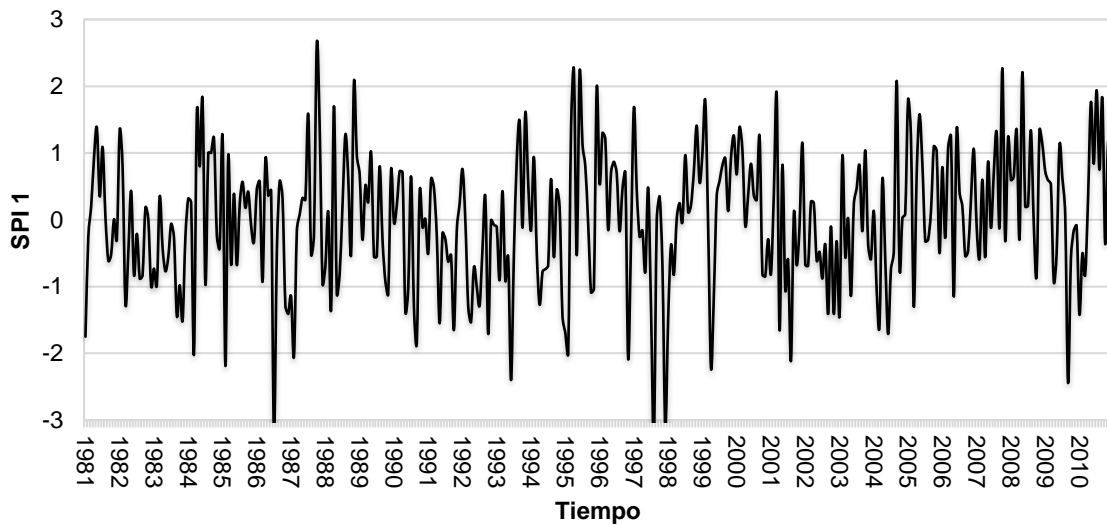


Figura 4-19: SPI (3 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).

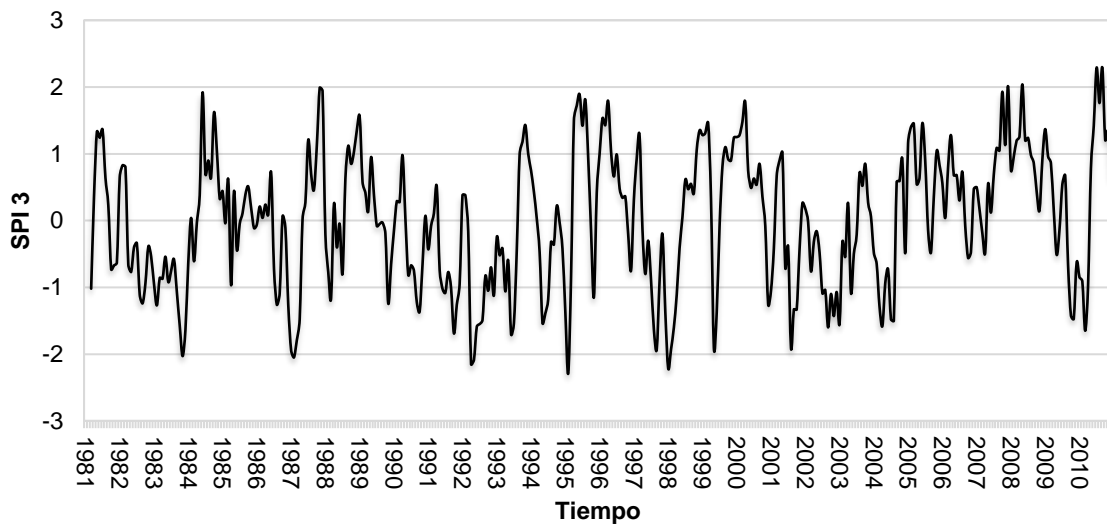
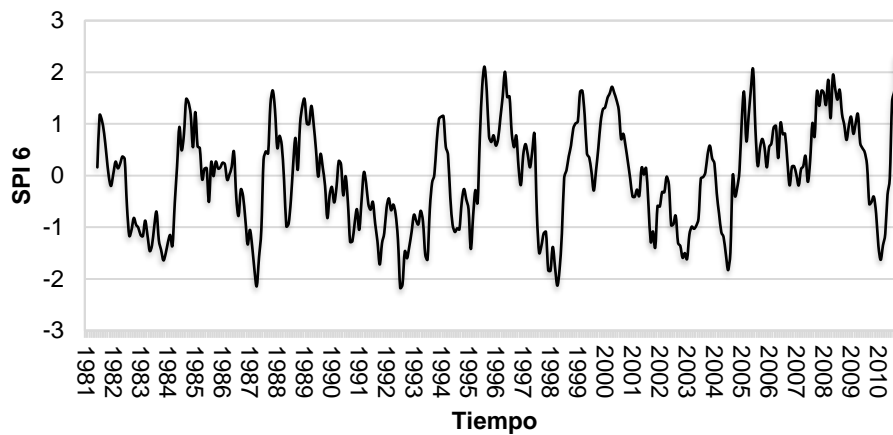
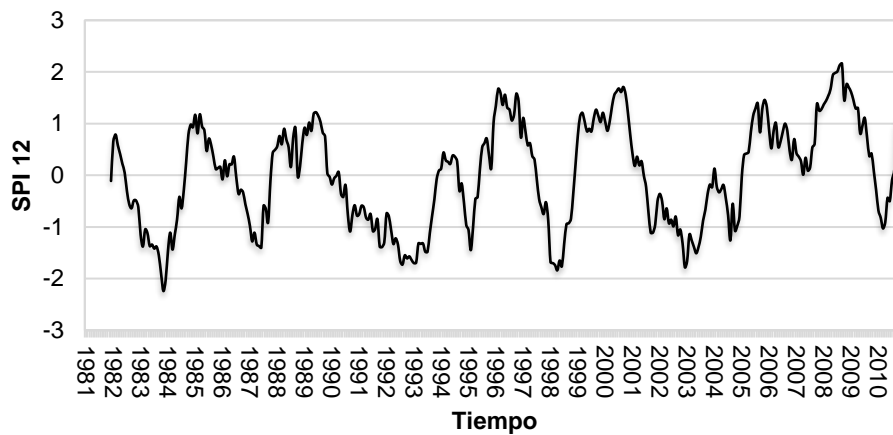
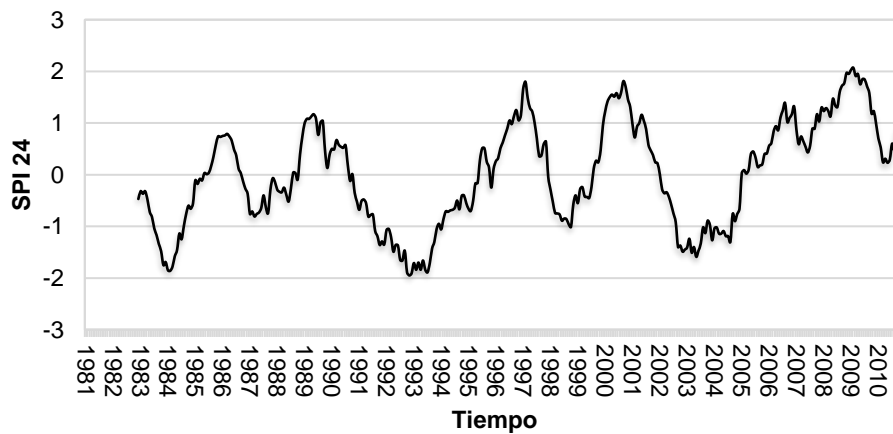


Figura 4-20: SPI (6 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).**Figura 4-21:** SPI (12 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).**Figura 4-22:** SPI (24 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).

4.3 Estimación de las correlaciones

Se realizaron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov a todas las estaciones comprendidas dentro del estudio ya que la información de cada estación supera los 50 datos, para determinar si era correcto utilizar el coeficiente de correlación de Pearson o el de Spearman.

Como se observa en la **Tabla 4-3** para el caso de la temperatura, no todas las estaciones presentan una significancia mayor a 0.05, esto indica que no poseen distribución normal y por ende no se debe utilizar el coeficiente de correlación de Pearson. Lo mismo ocurre en las estaciones presentes en las otras variables meteorológicas. Teniendo esto en cuenta todos los resultados presentados a continuación corresponden al coeficiente de correlación de Spearman.

Tabla 4-3: Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov.

Kolmogorov-Smirnov	Significancia
Santágueda	0.021
Granja Luker	0.200
Cenicafé	0.053
Naranjal	0.002
A. La Nubia	0.009
Agronomía	0.004
Las Brisas	0.096

En esta investigación se emplearon correlaciones sincrónicas o inmediatas y con rezagos de 1, 2 y 3 meses. En las diferentes tablas, ** indica una significancia estadística al 0.01 y * una significancia al 0.05.

La información de los índices climáticos se obtuvo de la página web de la NOAA (2017) y se compararon con variables climáticas como la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, el brillo solar, y con los índices agroclimáticos de amplitud térmica, tiempo térmico, déficit de brillo solar e índice estandarizado de la precipitación, mediante correlaciones de Spearman. El proceso de determinación de las correlaciones se presenta como ejemplo en la sección 4.3.1 para la precipitación, sin embargo, se realizó de igual forma para cada una de las variables climáticas y cada uno de los índices agroclimáticos para todas las estaciones dentro de la investigación.

4.3.1 Correlaciones con la precipitación

A continuación, en la **Tabla 4-4** se presentan los resultados de los coeficientes obtenidos entre cada estación y los índices climáticos. Los valores más altos se obtienen con los índices ONI, MEI, BEST y SOI, como correlaciones débiles. Estos 4 índices se encuentran asociados con el ENSO, poniendo en evidencia que esta oscilación es la que más influye sobre la cuenca. Con los demás índices se tiene una correlación escasa o nula.

Tabla 4-4: Correlaciones entre la precipitación y los índices climáticos.

	Arauca	Santágueda	Granja Luker	Ínsula	Cenicafé	La Francia	Montevideo
ONI	-0.17**	-0.26**	-0.28**	-0.28**	-0.31**	-0.25**	-0.29**
NAO	-0.08	-0.14**	-0.15**	-0.12*	-0.10	-0.13*	-0.03
PDO	0.06	-0.16**	-0.15**	-0.13*	-0.16**	-0.11	-0.19**
SOI	0.14**	0.25**	0.26**	0.27**	0.26**	0.18**	0.20**
NIÑO 1+2	-0.13*	-0.13*	-0.17**	-0.19**	-0.11*	-0.10	-0.07
NIÑO 3	-0.04	-0.03	-0.08	-0.11*	-0.11*	-0.01	-0.14*
NIÑO 4	-0.08	-0.12*	-0.15**	-0.12*	-0.19**	-0.16**	-0.23**
NIÑO 3,4	-0.03	-0.07	-0.11*	-0.14**	-0.18**	-0.06	-0.22**
WHWP	-0.04	0.02	0.01	0.02	-0.04	-0.01	-0.09
TNA	0.01	0.15**	0.15**	0.21**	0.12*	0.02	0.06
TSA	0.06	0.13*	0.19**	0.14**	0.18**	0.05	0.06
AMO	-0.14**	0.17**	0.16**	0.19**	0.10	0.03	0.04
MEI	-0.13*	-0.24**	-0.26**	-0.28**	-0.30**	-0.23**	-0.29**
PNA	-0.13*	-0.13*	-0.12*	-0.08	-0.10	-0.08	-0.12*
WP	-0.09	-0.07	-0.06	-0.04	-0.06	-0.02	-0.08
BEST	-0.17**	-0.25**	-0.28**	-0.27**	-0.29**	-0.21**	-0.24**
TNI	0.09	0.10	0.12*	0.00	0.11*	0.07	0.13*

	Naranjal	El Recreo	Bocatoma Campoalegre	Java	Planta Sancancio	Neira	Neira río Tapias	Subestación Uribe
ONI	-0.31**	-0.31**	-0.26**	-0.26**	-0.24**	-0.33**	-0.33**	-0.27**
NAO	-0.17**	-0.20**	-0.10	-0.06	-0.10	-0.07	-0.09	-0.03
PDO	-0.17**	-0.11*	-0.06	-0.12*	-0.10	-0.16**	-0.21**	-0.11*
SOI	0.26**	0.27**	0.18**	0.20**	0.18**	0.26**	0.22**	0.21**
NIÑO 1+2	-0.14**	-0.14*	-0.02	-0.07	-0.03	-0.08	-0.12*	-0.02
NIÑO 3	-0.07	-0.06	-0.07	-0.12*	-0.10	-0.16**	-0.23**	-0.11*
NIÑO 4	-0.17**	-0.19**	-0.19**	-0.17**	-0.18**	-0.24**	-0.23**	-0.24**
NIÑO 3,4	-0.13*	-0.11*	-0.15**	-0.19**	-0.17**	-0.24**	-0.28**	-0.20**
WHWP	-0.03	-0.02	-0.15**	-0.05	-0.08	-0.06	-0.01	-0.07
TNA	0.11*	0.12*	0.12*	0.09	0.05	0.08	0.15**	0.12*
TSA	0.20**	0.19**	0.20**	0.12*	0.15**	0.14**	0.12*	0.11*
AMO	0.14**	0.07	0.06	0.14**	0.01	0.11*	0.12*	-0.01
MEI	-0.28**	-0.29**	-0.25**	-0.26**	-0.25**	-0.31**	-0.31**	-0.25**
PNA	-0.16**	-0.10	-0.11*	-0.13*	-0.11*	-0.16**	-0.16**	-0.12*
WP	-0.01	-0.11	-0.08	-0.08	-0.03	-0.10	-0.06	-0.04
BEST	-0.28**	-0.29**	-0.24**	-0.24**	-0.22**	-0.30**	-0.29**	-0.25**
TNI	0.11*	0.17**	0.13*	0.10	0.12*	0.10	0.15**	0.26**

	Sub. Alta Suiza	A. La Nubia	Agronomía	Papayal	La Cristalina	Montenegro Q. Molinos	La Esperanza	Las Brisas
ONI	-0.24**	-0.24**	-0.30**	-0.22**	-0.23**	-0.25**	-0.20**	-0.19**
NAO	-0.07	-0.14**	-0.09	-0.14**	-0.04	-0.01	-0.13*	-0.11
PDO	-0.19**	-0.11*	-0.16**	-0.14**	-0.15**	-0.10	-0.09	-0.12
SOI	0.16**	0.16**	0.19**	0.19**	0.14**	0.17	0.19**	0.12*
NIÑO 1+2	-0.01	-0.06	-0.05	-0.03	-0.07	0.03	-0.16**	-0.05
NIÑO 3	-0.06	-0.07	-0.14*	-0.02	-0.13*	-0.02	-0.01	0.04
NIÑO 4	-0.19**	-0.14**	-0.23**	-0.15**	-0.19**	-0.19	-0.07	-0.09
NIÑO 3,4	-0.15**	-0.13*	-0.23**	-0.08	-0.18**	-0.12	-0.01	0.00
WHWP	-0.03	0.01	-0.04	0.01	-0.08	-0.06	0.06	-0.05
TNA	0.11*	0.16**	0.09	0.12*	0.04	-0.01	0.13*	0.01
TSA	0.14**	0.18**	0.15**	0.14**	0.09	0.05	0.12*	0.15**
AMO	0.08	0.15**	0.10	0.10	-0.01	0.01	0.03	0.04
MEI	-0.25**	-0.22**	-0.29**	-0.20**	-0.23**	-0.22	-0.16**	-0.17**
PNA	-0.14**	-0.11*	-0.12*	-0.12*	-0.13*	-0.15	-0.14**	-0.13*
WP	-0.03	-0.05	-0.05	-0.08	-0.06	0.01	-0.08	0.01
BEST	-0.21**	-0.21**	-0.26**	-0.21**	-0.20**	-0.21	-0.20**	-0.16**
TNI	0.14**	0.11*	0.15**	0.20**	0.16**	0.15	0.13*	0.10

La precipitación tiene correlación negativa con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4 y 3,4, WHWP, MEI, PNA, WP y BEST; y correlación positiva con los índices SOI, TNA, TSA, AMO y TNI.

Con todas las estaciones, las variables (precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar) y los índices agroclimáticos (TT, AT, DBS, SPI), se realizaron diferentes combinaciones para determinar la forma de obtener valores más altos de correlación. Estas combinaciones fueron:

- **Combinación 1:** El valor del índice vs. el valor mensual de la variable.
- **Combinación 2:** El valor del índice vs. la variable promediada cada 2 meses, es decir, para el valor de enero se tomó el promedio entre enero - febrero, para el valor de febrero se tomó el promedio de febrero - marzo y así sucesivamente.
- **Combinación 3:** El valor del índice vs. la variable promediada cada 3 meses. Al igual que en el caso anterior, pero teniendo en cuenta 3 meses y la variable centrada. Por ejemplo, para el valor de julio, se tomó el promedio de junio-julio-agosto.
- **Combinación 4:** Promediando el valor del índice cada 2 y 3 meses vs. el valor mensual de la variable. En el caso de 2 meses, se tomó el valor del mes anterior para realizar el promedio, es decir, para el valor del índice de julio se tomó el promedio entre junio-julio. En el caso de los 3 meses se realizó centrado, esto es, para el valor de agosto se tomó el promedio julio-agosto-septiembre.
- **Combinación 5:** Promediando tanto el índice como la variable cada 2 y 3 meses.

De acuerdo a los cálculos y análisis realizados con cada una de las combinaciones se encontró que:

- Los resultados demostraron valores más altos cuando se trabajó con el promedio de la variable de 3 meses (combinación 3), para todas las otras combinaciones analizadas los valores no mejoraron significativamente.
- En el caso donde solo se promedió el índice climático (combinación 4) las correlaciones fueron inferiores a las demás combinaciones.
- Cuando se promediaron tanto el índice como la variable (combinación 5), el resultado es prácticamente igual al de las combinaciones 1, 2 y 3, índice mensual vs. promedio de variable.

Por lo anterior, se tomó como correlación definitiva la combinación del valor mensual del índice vs. la variable promediada cada 3 meses (combinación 3), ya que fueron los resultados obtenidos con los coeficientes de correlación más altos.

Como ejemplo se presenta en la **Tabla 4-5** la comparación de los coeficientes de correlación obtenidos con el índice ONI vs. la variable mensual con las combinaciones 1, 2 y 3. Los resultados de cada una de las correlaciones con los otros índices climáticos presentaron el mismo comportamiento. Es importante resaltar que la correlación entre el ONI y la precipitación es negativa para todos los casos.

Tabla 4-5: Correlaciones entre la precipitación promediada y el índice ONI.

Promedio	Arauca	Santágueda	Granja Luker	Ínsula	Cenicafé	La Francia	Montevideo	Naranjal
1 mes	-0.17**	-0.26**	-0.28**	-0.28**	-0.31**	-0.25**	-0.29**	-0.31**
2 meses	-0.23**	-0.34**	-0.38**	-0.33**	-0.39**	-0.31**	-0.36**	-0.37**
3 meses	-0.26**	-0.39**	-0.43**	-0.36**	-0.46**	-0.37**	-0.42**	-0.43**

Promedio	El Recreo	Boc. Campoalegre	Java	Planta Sancancio	Neira	Neira río Tapias	Sub. Uribe	Sub. Alta Suiza
1 mes	-0.31**	-0.26**	-0.26**	-0.24**	-0.33**	-0.33**	-0.27**	-0.24**
2 meses	-0.39**	-0.32**	-0.34**	-0.26**	-0.39**	-0.38**	-0.29**	-0.28**
3 meses	-0.44**	-0.36**	-0.38**	-0.30**	-0.44**	-0.44**	-0.32**	-0.33**

Promedio	Aeropuerto La Nubia	Agronomía	Papayal	La Cristalina	Montenegro Q. Molinos	La Esperanza	Las Brisas
1 mes	-0.24**	-0.30**	-0.22**	-0.23**	-0.25**	-0.20**	-0.19**
2 meses	-0.28**	-0.35**	-0.26**	-0.26**	-0.27**	-0.26**	-0.22**
3 meses	-0.30**	-0.40**	-0.29**	-0.28**	-0.30**	-0.29**	-0.23**

Igualmente se realizó el análisis con rezagos de 0 (R0), 1 (R1), 2 (R2) y 3 (R3) meses para cada combinación. En la **Tabla 4-6** se presenta el ejemplo con el índice ONI y la combinación 3, se puede observar que, para el caso de la precipitación, las mejores

correlaciones se dan con un rezago R0. Este análisis de los rezagos se determinó para cada variable climática y cada índice agroclimático correlacionado.

Tabla 4-6: Correlaciones entre la precipitación promediada cada 3 meses y el índice ONI con rezagos de 0, 1, 2 y 3 meses, R0, R1, R2 y R3, respectivamente.

Rezago	Arauca	Santágueda	Granja Luker	Ínsula	Cenicafé	La Francia	Montevideo	Naranjal
R0	-0.17**	-0.26**	-0.28**	-0.28**	-0.31**	-0.25**	-0.29**	-0.31**
R1	-0.15**	-0.25**	-0.27**	-0.26**	-0.30**	-0.25**	-0.30**	-0.30**
R2	-0.13**	-0.25**	-0.26**	-0.24**	-0.29**	-0.25**	-0.29**	-0.29**
R3	-0.11**	-0.23**	-0.23**	-0.19**	-0.26**	-0.23**	-0.28**	-0.26**

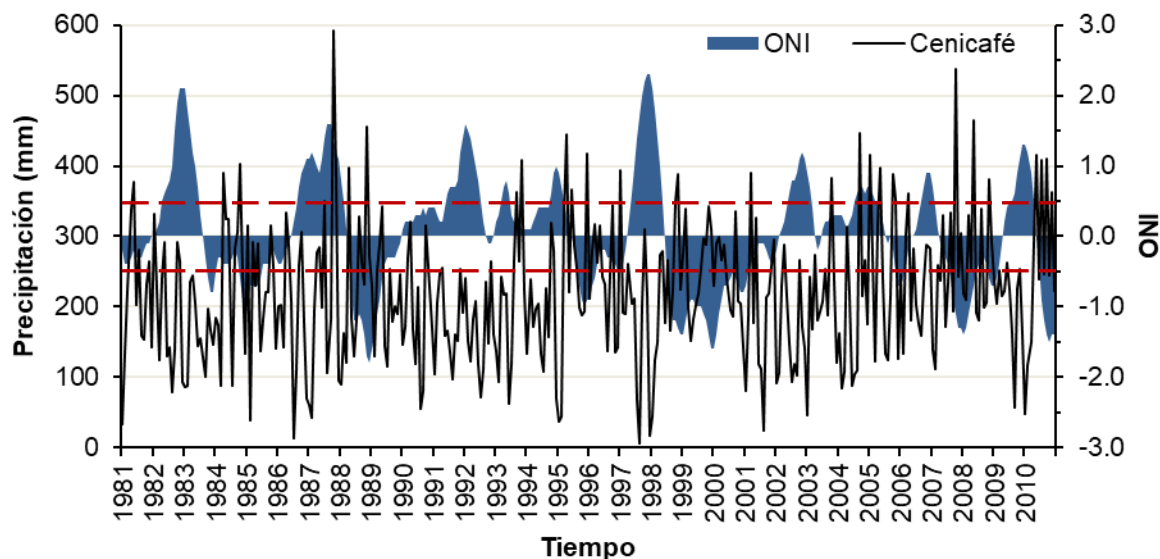
Rezago	El Recreo	Bocatoma Campoalegre	Java	Planta Sancancio	Neira	Neira río Tapias	Sub. Uribe	Sub. Alta Suiza
R0	-0.31**	-0.26**	-0.26**	-0.24**	-0.33**	-0.33**	-0.27**	-0.24**
R1	-0.31**	-0.25**	-0.25**	-0.24**	-0.32**	-0.31**	-0.26**	-0.24**
R2	-0.30**	-0.22**	-0.23**	-0.22**	-0.29**	-0.28**	-0.24**	-0.24**
R3	-0.25**	-0.19**	-0.20**	-0.19**	-0.25**	-0.23**	-0.21**	-0.22**

Rezago	Aeropuerto La Nubia	Agronomía	Papayal	La Cristalina	Montenegro Q. Molinos	La Esperanza	Las Brisas
R0	-0.24**	-0.30**	-0.22**	-0.23**	-0.25**	-0.20**	-0.19**
R1	-0.22**	-0.29**	-0.21**	-0.23**	-0.25**	-0.19**	-0.17**
R2	-0.20**	-0.27**	-0.20**	-0.22**	-0.24**	-0.17**	-0.16**
R3	-0.16**	-0.23**	-0.18**	-0.20**	-0.20**	-0.14**	-0.15**

Los valores más altos de las correlaciones obtenidas entre la precipitación de las estaciones y los índices climáticos se dieron con el ONI, el MEI y el BEST. Con el fin de realizar un análisis espacio - temporal se presenta en la **Figura 4-26** la distribución espacial de las correlaciones para estos 3 índices climáticos y en las figuras **4-23**, **4-24** y **4-25**, el comportamiento a través del tiempo a escala mensual de la precipitación vs. el índice, para la estación Cenicafé, como una representación del comportamiento histórico general de todas las demás estaciones.

En la **Figura 4-23**, se presenta la comparación entre la precipitación de la estación Cenicafé y el índice ONI, para el periodo 1981 – 2010. Se puede observar que en general a lo largo del tiempo si el ONI toma valores negativos por encima de -0.5 indicando la ocurrencia del ENSO en su fase fría (La Niña) la precipitación aumenta, en contraste, cuando el ONI toma valores positivos por encima de 0.5 indicando la ocurrencia de la fase cálida (El Niño), los valores de precipitación se ven disminuidos e incluso en algunos años se presentan los mínimos históricos, como se observa en El Niño ocurrido en 1997 y 1998, donde el ONI toma valores cercanos a 2.4 entre los meses de octubre (1997) y enero (1998), siendo los más altos registrados para el índice y categorizado como un Niño fuerte extraordinario que trajo numerosas pérdidas estimadas en US\$7,543 millones para la Comunidad Andina de Naciones, de los cuales para Colombia se destinaron 7,1% (US\$564 millones) del total (Jovel, 2000).

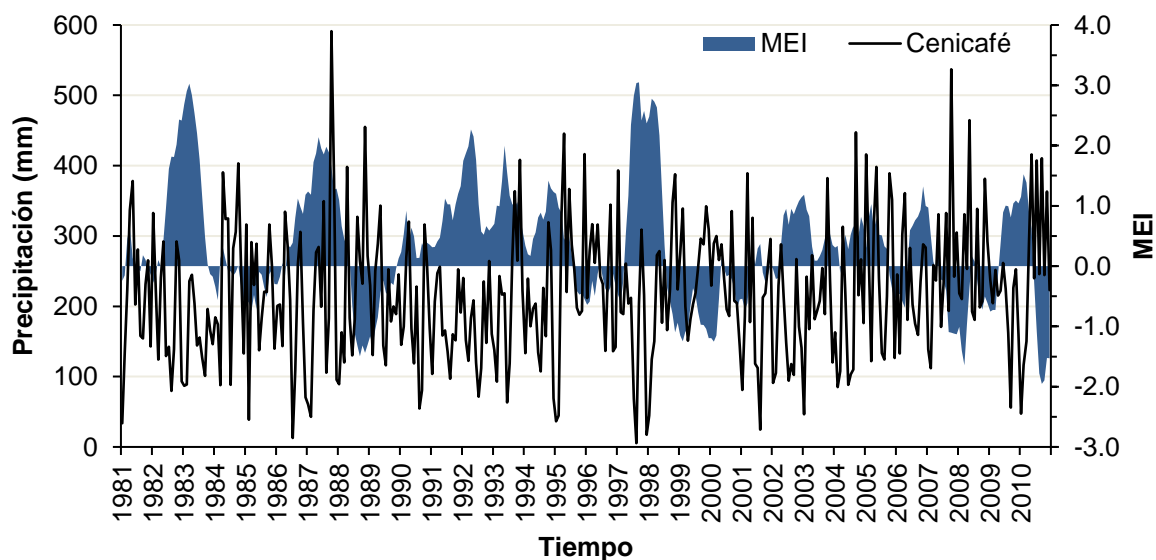
Figura 4-23: Comparación entre la precipitación y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas marcan los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

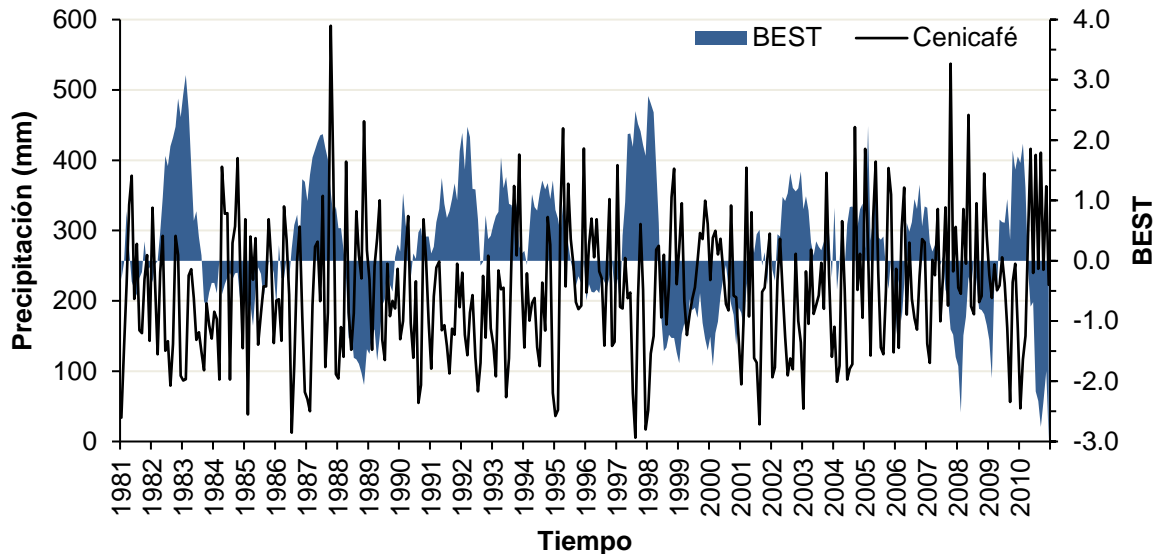
En la **Figura 4-24**, se presenta la comparación entre la precipitación de la estación Cenicafé y el índice MEI, para el periodo 1981 – 2010, este índice frente al ONI presenta un comportamiento similar, la precipitación aumenta cuanto el MEI toma valores negativos y disminuye cuando son positivos lo que manifiesta una correlación inversa o negativa.

Figura 4-24: Comparación entre la precipitación y el índice MEI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



El índice BEST, presentado en la **Figura 4-25**, muestra la misma tendencia a través de los años respecto a los anteriores (ONI, MEI) con el comportamiento de la precipitación, manifestando por lo general una relación inversa, a medida que el BEST aumenta la precipitación disminuye, en los casos en los que no se conserva esta tendencia se podría inferir que están asociados a la influencia de uno o varios fenómenos de variabilidad climática.

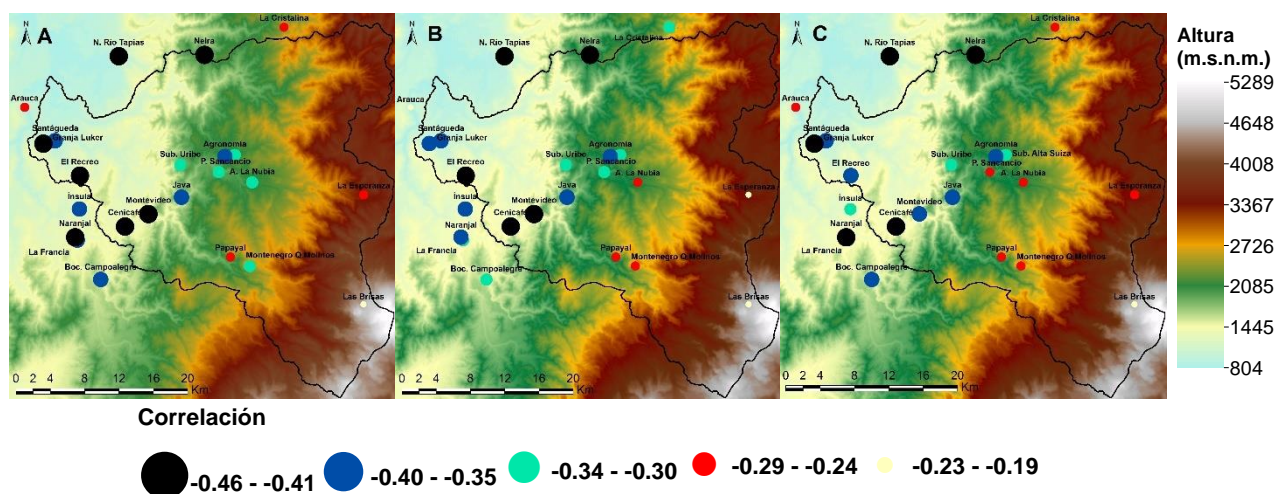
Figura 4-25: Comparación entre la precipitación y el índice BEST en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



La distribución espacial de los resultados entre el ONI (A), MEI (B), BEST (C) y la precipitación promediada cada 3 meses (combinación 3), se presentan en la **Figura 4-26**. Respecto al ONI, en la parte alta de la cuenca la correlación es baja con valores negativos entre -0.23 y -0.29, sin embargo, a medida que disminuye la elevación, aumentan los coeficientes, tomando valores entre -0.30 y -0.40 para la cuenca media, y entre -0.41 y -0.46 para la cuenca baja, donde se presenta la relación más alta con un total de 6 estaciones. Las correlaciones encontradas se clasifican como débiles negativas y varían dependiendo de la localización de la estación asociada a la medida de precipitación. Para la cuenca en general, al igual que con el ONI (A), a medida que disminuye la altura mayor es la correlación con el índice MEI (B), no obstante, el número de estaciones que presentan las relaciones más altas son menores comparadas con los resultados del ONI.

Para el índice BEST (C) se presentan correlaciones menores en la cuenca media y alta, con respecto a los otros dos índices, entre -0.19 y -0.29, sin embargo, en la cuenca baja se mantiene el rango entre -0.40 y -0.46. Es importante mencionar que la estación Arauca no presenta el mismo comportamiento general de las estaciones cercanas, esto puede deberse a otros efectos de variabilidad climática adicionales presentes en la ubicación propia de la estación.

Figura 4-26: Correlaciones entre la precipitación, el índice ONI (A), MEI (B) y BEST (C) promediando la variable cada 3 meses.



4.3.2 Correlaciones con la temperatura

Utilizando el mismo análisis presentado en la sección 4.3.1, en la temperatura media los mejores resultados se obtuvieron con la variable promediada cada 3 meses al igual que en la precipitación (combinación 3), pero con un mejor ajuste cuando se considera un rezago de 1 mes. Si se comparan los resultados obtenidos entre cada índice climático, la temperatura media mensual (combinación 1, ver **Tabla 4-7**) y la combinación 3 (ver **Tabla 4-8**), se puede observar que en general se logra un incremento en los coeficientes de aproximadamente 0.1 para cada valor con esta última combinación.

Tabla 4-7: Correlaciones entre la temperatura media y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.49**	0.51**	0.63**	0.51**	0.48**	0.57**	0.49**
NAO	-0.02	-0.08	0.05	0.01	-0.19**	0.03	-0.02
PDO	0.30**	0.19**	0.34**	0.34**	0.28**	0.25**	0.21**
SOI	-0.33**	-0.35**	-0.48**	-0.37**	-0.34**	-0.42**	-0.33**
NIÑO 1+2	0.36**	0.31**	0.40**	0.43**	0.35**	0.38**	0.40**
NIÑO 3	0.51**	0.49**	0.54**	0.57**	0.59**	0.52**	0.53**
NIÑO 4	0.37**	0.48**	0.46**	0.37**	0.48**	0.47**	0.39**
NIÑO 3,4	0.51**	0.54**	0.58**	0.55**	0.62**	0.55**	0.52**
WHWP	0.30**	0.48**	0.31**	0.29**	0.52**	0.36**	0.42**
TNA	0.18**	0.39**	0.08	0.11*	0.43**	0.14**	0.29**
TSA	0.04	0.11	-0.08	-0.07	0.14*	-0.05	0.05
AMO	0.16**	0.28**	0.00	0.07	0.24**	0.12*	0.25**
MEI	0.46**	0.50**	0.62**	0.53**	0.51**	0.56**	0.47**

PNA	0.20**	0.17**	0.21**	0.21**	0.19**	0.19**	0.23**
WP	0.07	0.12*	0.10*	0.05	0.07	0.10*	0.09
BEST	0.45**	0.48**	0.60**	0.48**	0.45**	0.54**	0.45**
TNI	-0.21**	-0.27**	-0.29**	-0.16**	-0.21**	-0.30**	-0.17**

Tabla 4-8: Correlaciones entre la temperatura promediada cada 3 meses y los índices climáticos con rezago de 1 mes.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.59**	0.60**	0.75**	0.62**	0.56**	0.68**	0.59**
NAO	0.00	0.00	0.12*	0.07	-0.09	0.10	0.04
PDO	0.28**	0.14*	0.34**	0.35**	0.33**	0.23**	0.19**
SOI	-0.40**	-0.38**	-0.55**	-0.42**	-0.36**	-0.49**	-0.36**
NIÑO 1+2	0.47**	0.40**	0.51**	0.60**	0.50**	0.50**	0.51**
NIÑO 3	0.60**	0.57**	0.64**	0.68**	0.67**	0.63**	0.60**
NIÑO 4	0.48**	0.57**	0.59**	0.45**	0.48**	0.58**	0.47**
NIÑO 3,4	0.61**	0.64**	0.70**	0.65**	0.64**	0.67**	0.59**
WHWP	0.32**	0.47**	0.30**	0.28**	0.46**	0.36**	0.41**
TNA	0.19**	0.38**	0.05	0.10	0.40**	0.12*	0.28**
TSA	0.03	0.14*	-0.10	-0.04	0.19**	-0.05	0.06
AMO	0.18**	0.36**	0.00	0.09	0.26**	0.14**	0.29**
MEI	0.52**	0.53**	0.71**	0.60**	0.54**	0.64**	0.54**
PNA	0.19**	0.18**	0.20**	0.23**	0.21**	0.18**	0.23**
WP	0.08	0.14*	0.11*	0.05	0.09	0.12*	0.10
BEST	0.55**	0.54**	0.71**	0.57**	0.50**	0.64**	0.53**
TNI	-0.19**	-0.27**	-0.29**	-0.15**	-0.19**	-0.30**	-0.17**

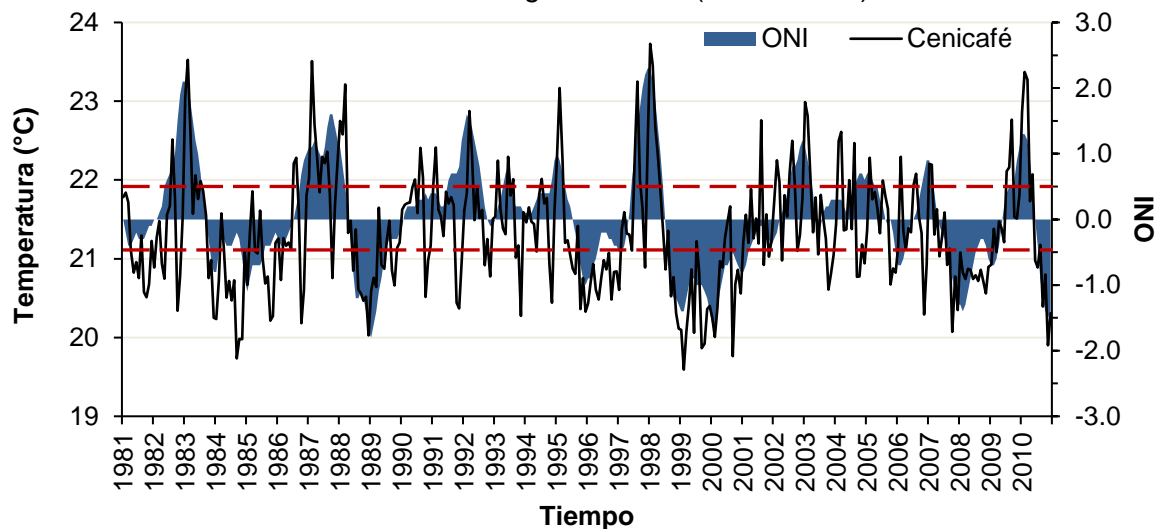
Los mejores resultados de correlación entre los índices climáticos y la temperatura media se lograron con el ONI, el Niño 3 y el Niño 3,4. Se presentan correlaciones escasas o nulas con los índices NAO, TNA, TSA, AMO, PNA y WP; débiles con: PDO, WHWP y TNI; y moderadas a fuertes con: ONI, SOI, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, MEI y BEST. La temperatura tiene correlación negativa con los índices SOI y TNI; y correlación positiva con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4 y 3,4, WHWP, TNA, TSA, AMO, MEI, PNA, WP y BEST.

Para realizar un estudio más detallado del comportamiento de estos coeficientes se hizo un análisis de la distribución espacial de las correlaciones en la cuenca del río Chinchiná, presentado en la **Figura 4-30**. En las figuras **4-27**, **4-28** y **4-29**, se observa el desarrollo a través del tiempo a escala mensual de la temperatura promedio en la estación Cenicafé, el ONI, el Niño 3 y el Niño 3,4. En general para todas las estaciones se presentó el mismo comportamiento histórico.

Observando la temperatura media en la estación Cenicafé y el índice ONI durante el periodo 1981 – 2010, se aprecia que en general a lo largo del tiempo cuando el ONI toma valores positivos la temperatura media aumenta, caso contrario sucede cuando el ONI toma valores negativos en el cual la temperatura media disminuye. Esta relación es

fácilmente apreciable de forma gráfica en la **Figura 4-27**, en donde concuerda la tendencia entre la variable y el índice, teniendo que para los valores más altos del ONI, se presentan los registros más altos de temperatura media con 23.5°C en febrero del año 1983 y 23.7°C en enero del año 1998.

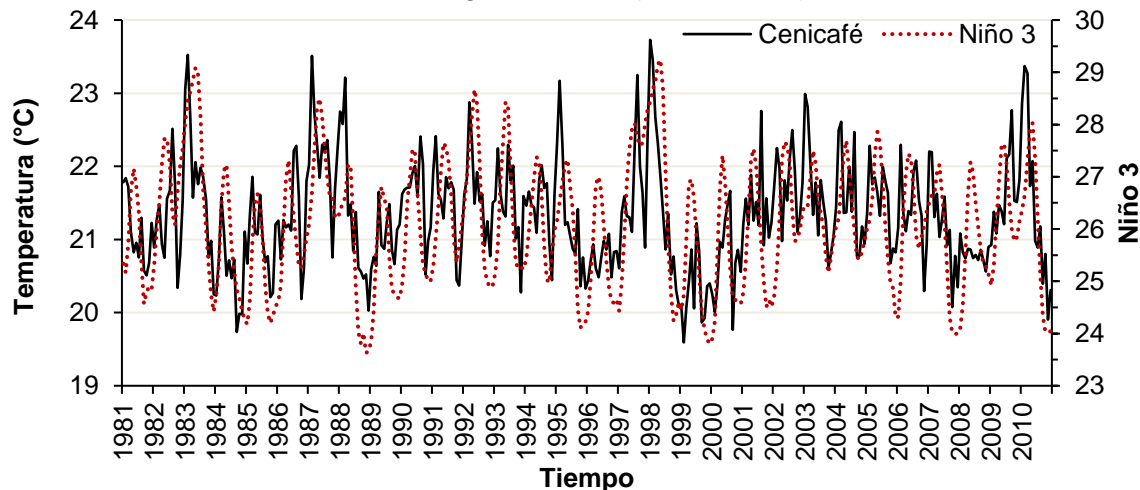
Figura 4-27: Comparación entre la temperatura media y el índice ONI en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas indican los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

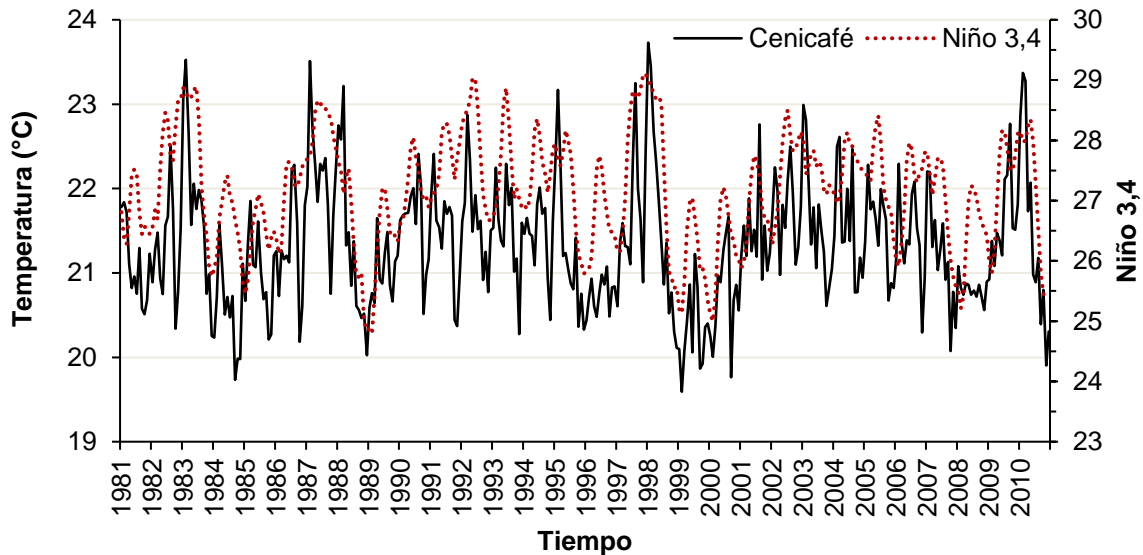
En la **Figura 4-28** se puede observar que las series tanto de temperatura media como del índice Niño 3, presentan las mismas tendencias de aumentar o disminuir a través de los años con una pequeña variación en los extremos en especial cuando el índice Niño 3 toma valores mínimos. Los valores máximos del índice y la temperatura coinciden en el mismo tiempo, mientras que los mínimos son más variables.

Figura 4-28: Comparación entre la temperatura y el índice Niño 3 en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).



Con respecto a la comparación a lo largo del tiempo entre la temperatura promedio de 3 meses y el índice Niño 3,4, se puede decir que a pesar de que se existe una relación directa de aumento o disminución de ambas variables a lo largo de los años, no es tan evidente de manera visual debido a que se presentan discrepancias en la tendencia, como se observa en la **Figura 4-29**.

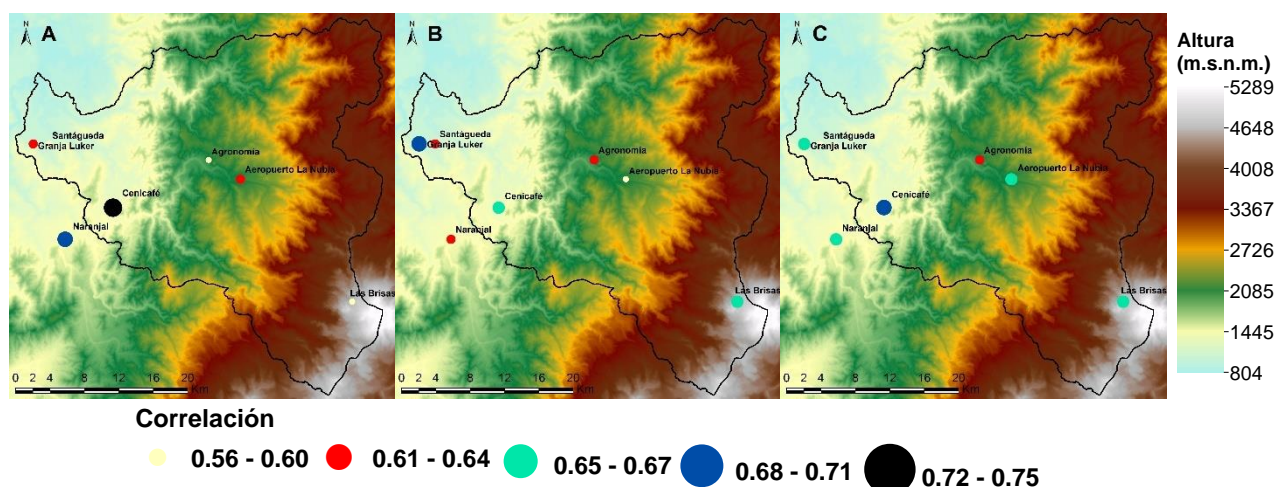
Figura 4-29: Comparación entre la temperatura y el índice Niño 3,4 en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).



Al realizar el análisis espacial se encontró que las correlaciones entre el ONI, el Niño 3, el Niño 3,4 y la temperatura media promediada cada 3 meses no evidencian una relación con la altitud, no obstante, para el ONI (A), presentan valores positivos entre 0.56 en la estación las Brisas y 0.75 para la estación de Cenicafé, estos coeficientes de correlación se encuentran más cercanos a 1, en comparación con la precipitación, y manifiestan en general para toda la cuenca una correlación positiva moderada a fuerte (ver **Figura 4-30**).

Los resultados con el índice Niño 3 (B) oscilan entre 0.57 y 0.68, son inferiores si se comparan con los valores de correlación asociados al índice ONI (A). Es importante resaltar que este índice tiene un valor alto de correlación con la estación las Brisas que particularmente es la que con los demás indicadores no presenta tan buena correlación.

Respecto al índice Niño 3,4 (C), sus valores se encuentran entre 0.59 y 0.70, siendo más bajo que el ONI, pero mejor que el Niño 3.

Figura 4-30: Correlaciones entre la temperatura promediada cada 3 meses, el índice ONI (A), Niño 3 (B) y Niño 3,4 (C), con rezago de 1 mes.

4.3.3 Correlaciones con la humedad relativa

Utilizando el mismo análisis presentado en la sección 4.3.1, se presentan en la **Tabla 4-9** los resultados de correlacionar cada índice climático con la humedad relativa mensual. Los valores más altos se presentan promediando la variable cada 3 meses, pero a diferencia de la temperatura sin rezago, ver **Tabla 4-10**.

Tabla 4-9: Correlaciones entre la humedad relativa y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafe	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	-0.49**	-0.19**	-0.43**	-0.26**	0.01	-0.20**	-0.28**
NAO	-0.10	-0.09	-0.15**	-0.24**	0.10	-0.14**	-0.12*
PDO	-0.27**	-0.14*	-0.35**	-0.29**	0.04	0.05	-0.25**
SOI	0.40**	0.19**	0.37**	0.28**	-0.05	0.20**	0.33**
NIÑO 1+2	-0.07	-0.19**	-0.15**	-0.22**	-0.03	-0.09	-0.18**
NIÑO 3	-0.18**	-0.21**	-0.14**	-0.14**	0.00	-0.08	-0.14**
NIÑO 4	-0.43**	-0.07	-0.17**	0.07	-0.07	-0.21**	-0.15**
NIÑO 3,4	-0.33**	-0.13*	-0.21**	-0.09	0.02	-0.10	-0.17**
WHWP	-0.11	-0.04	0.12*	0.22**	-0.17**	-0.13*	0.05
TNA	0.01	-0.04	0.30**	0.40**	-0.26**	-0.11*	0.28**
TSA	0.14**	0.06	0.28**	0.26**	-0.09	0.17**	0.13*
AMO	0.12*	-0.12	0.53**	0.62**	-0.37**	-0.30**	0.21**
MEI	-0.44**	-0.17**	-0.42**	-0.26**	0.00	-0.15**	-0.31**
PNA	-0.06	-0.18**	-0.09	-0.05	-0.08	-0.07	-0.04
WP	-0.02	-0.08	0.00	-0.04	-0.06	-0.02	-0.04
BEST	-0.48**	-0.18**	-0.40**	-0.25**	0.00	-0.22**	-0.33**
TNI	0.37**	-0.05	0.08	-0.13*	0.02	0.22**	0.12*

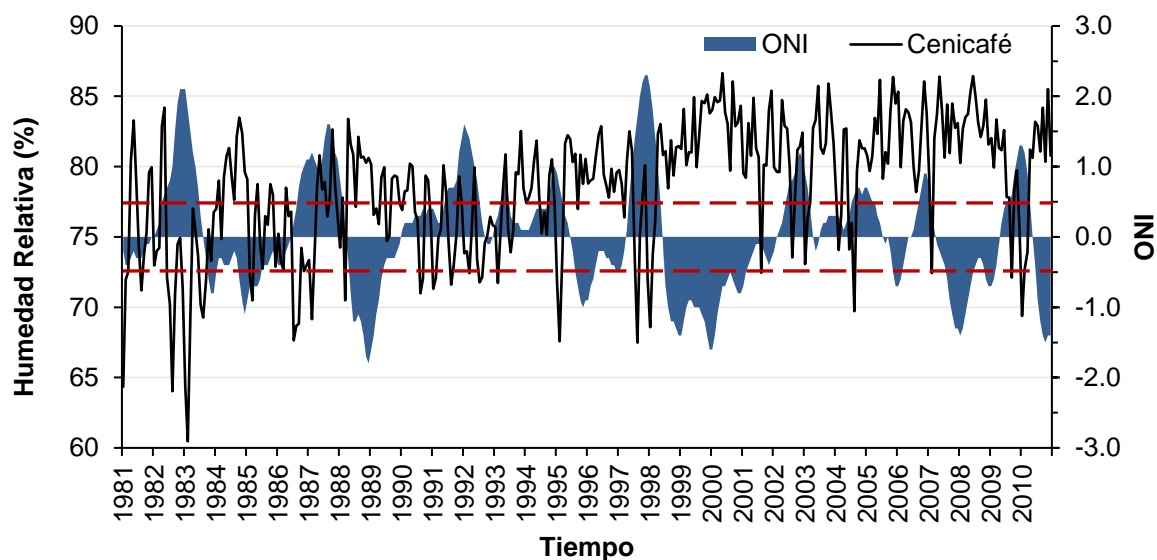
Tabla 4-10: Correlaciones entre la humedad relativa promediada cada 3 meses y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafe	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	-0.59**	-0.23**	-0.51**	-0.29**	0.03	-0.24**	-0.32**
NAO	-0.12*	-0.05	-0.16**	-0.24**	0.10	-0.14**	-0.12*
PDO	-0.32**	-0.16**	-0.40**	-0.30**	0.07	0.05	-0.26**
SOI	0.47**	0.21**	0.43**	0.31**	-0.03	0.23**	0.36**
NIÑO 1+2	-0.05	-0.20**	-0.18**	-0.23**	-0.05	-0.09	-0.18**
NIÑO 3	-0.21**	-0.26**	-0.20**	-0.17**	0.03	-0.11*	-0.17**
NIÑO 4	-0.55**	-0.12*	-0.25**	0.04	-0.04	-0.27**	-0.20**
NIÑO 3,4	-0.42**	-0.20**	-0.30**	-0.14**	0.06	-0.16**	-0.22**
WHWP	-0.14*	-0.07	0.12*	0.25**	-0.12	-0.17**	0.04
TNA	0.02	-0.06	0.34**	0.44**	-0.19**	-0.14*	0.30**
TSA	0.18**	0.08	0.32**	0.28**	-0.07	0.20**	0.14**
AMO	0.15**	-0.14*	0.61**	0.68**	-0.27**	-0.36**	0.22**
MEI	-0.53**	-0.22**	-0.50**	-0.30**	0.02	-0.18**	-0.35**
PNA	-0.05	-0.16**	-0.09	-0.03	-0.02	-0.06	-0.05
WP	-0.04	-0.08	-0.01	-0.05	-0.07	-0.03	-0.06
BEST	-0.57**	-0.22**	-0.46**	-0.28**	0.01	-0.26**	-0.37**
TNI	0.43**	-0.04	0.10	-0.15**	-0.01	0.25**	0.14**

Los índices climáticos que mejor se relacionan con la humedad relativa son el ONI, el MEI y el BEST, adicionalmente la correlación es negativa para toda la cuenca, lo que indica que cuando la humedad relativa disminuye el índice aumenta y viceversa, este comportamiento de las correlaciones es semejante al de la precipitación. Se presentan correlaciones escasas o nulas con los índices NAO, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, WHWP, TNA, TSA, PNA, WP y TNI; y débiles con el ONI, PDO, SOI, AMO, MEI y BEST. Tiene correlación negativa con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4 y 3,4, WHWP, MEI, PNA, WP y BEST; y correlación positiva con los índices SOI, TNA, TSA, AMO y TNI.

En la **Figura 4-31**, se presenta la comparación entre la humedad relativa de la estación Cenicafé y el índice ONI, para el periodo 1981 – 2010, en la cual se puede observar que en general a lo largo del tiempo si el ONI toma valores negativos la humedad relativa aumenta, y cuando el ONI toma valores positivos, los valores de humedad relativa disminuyen.

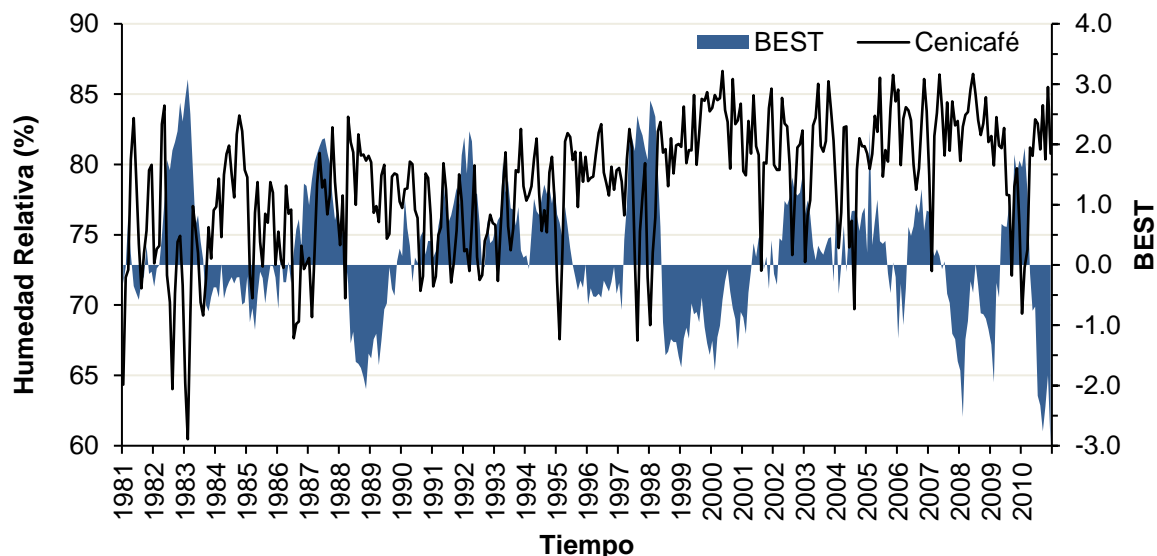
Figura 4-31: Comparación entre la humedad relativa y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas indican los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

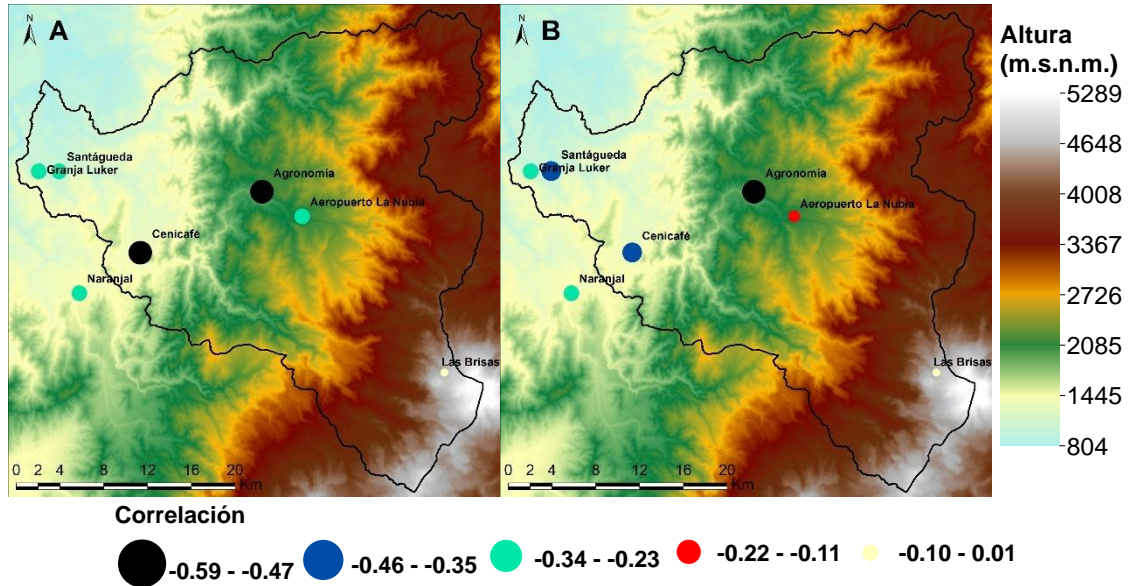
El índice climático BEST mantiene la misma tendencia a través de los años que el ONI, ilustrando por lo general una relación inversa, a medida que el BEST aumenta la humedad relativa disminuye. En la estación Cenicafé se puede observar que los extremos tanto en la variable como en el índice se presentan en el mismo tiempo, ver **Figura 4-32**.

Figura 4-32: Comparación entre la humedad relativa y el índice BEST en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



La distribución espacial de las correlaciones se presenta en la **Figura 4-33** para el ONI (A) y el BEST (B), en donde en la parte alta de la cuenca la correlación es escasa o nula, con valores muy cercanos a 0 en la estación Las Brisas. La mejor relación se presenta en la cuenca media en la estación Agronomía, esta es moderada con valores de 0.57 (BEST) y 0.59 (ONI). En la cuenca baja los coeficientes se encuentran dentro del rango -0.23 a -0.46 correspondientes a una relación débil.

Figura 4-33: Correlaciones entre la humedad relativa promediada cada 3 meses, el índice ONI (A) y BEST (B).



4.3.4 Correlaciones con el brillo solar

Utilizando el mismo análisis presentado en la sección 4.3.1, En la **Tabla 4-11** y en la **Tabla 4-12** se puede comparar que los valores de correlación entre el brillo solar y cada uno de los índices climáticos son mayores con la variable promediada cada 3 meses (combinación 3), al igual que la precipitación y la humedad relativa, el brillo solar tiene una respuesta inmediata frente a los índices climáticos.

Tabla 4-11: Correlaciones entre el brillo solar y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.31**	0.18**	0.29**	0.26**	0.14*	0.31**	0.21**
NAO	0.10	0.10	0.07	0.07	0.04	0.07	0.08
PDO	0.13*	0.11	0.19**	0.15**	0.11	0.17**	0.12*
SOI	-0.29**	-0.15**	-0.29**	-0.23**	-0.16*	-0.30**	-0.20**
NIÑO 1+2	0.11*	0.07	0.03	0.06	0.12	0.05	0.03
NIÑO 3	0.05	-0.06	-0.02	0.01	-0.01	0.02	-0.06
NIÑO 4	0.21**	0.10	0.17**	0.15**	0.07	0.21**	0.11*
NIÑO 3,4	0.11*	-0.01	0.07	0.08	0.03	0.11*	0.01

WHWP	0.00	-0.08	-0.05	-0.08	0.06	0.01	-0.05
TNA	-0.07	-0.07	-0.12*	-0.11*	0.00	-0.07	-0.06
TSA	-0.12*	-0.08	-0.14**	-0.11*	0.01	-0.10	-0.04
AMO	0.04	-0.09	-0.15**	-0.11*	-0.03	-0.04	-0.01
MEI	0.28**	0.16**	0.26**	0.23**	0.17**	0.27**	0.18**
PNA	0.10	0.15*	0.12*	0.12*	0.14*	0.14**	0.13*
WP	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.04	0.02	-0.04
BEST	0.31**	0.17**	0.29**	0.25**	0.16**	0.32**	0.20**
TNI	-0.16**	-0.15*	-0.16**	-0.19**	0.02	-0.21**	-0.14**

Tabla 4-12: Correlaciones entre el brillo solar promediado cada 3 meses y los índices climáticos.

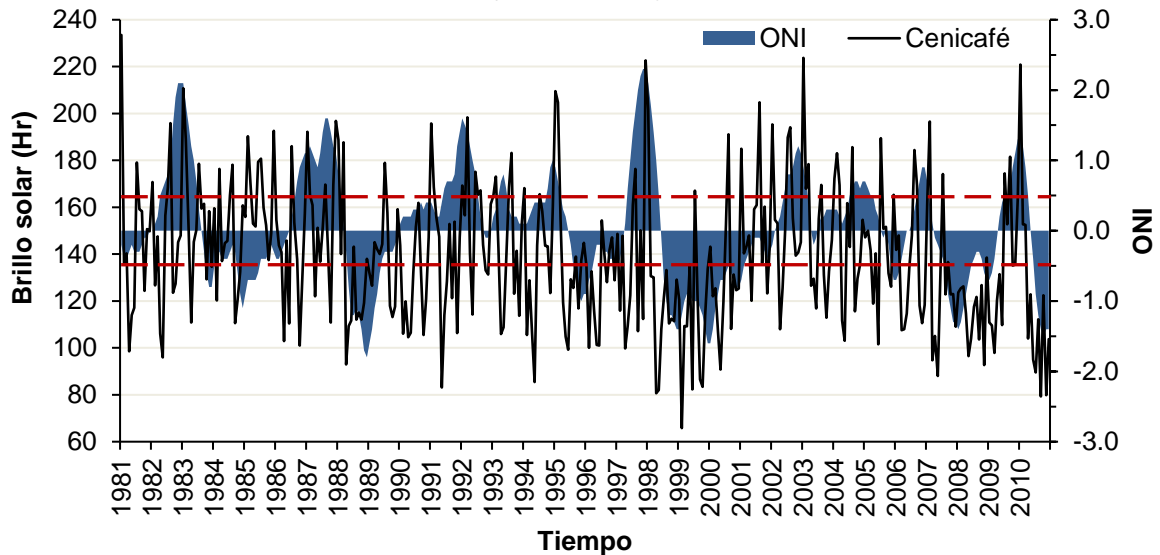
	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.41**	0.26**	0.41**	0.38**	0.22**	0.44**	0.31**
NAO	0.10	0.15**	0.12*	0.11*	0.08	0.10	0.13*
PDO	0.16**	0.17**	0.26**	0.20**	0.17**	0.23**	0.17**
SOI	-0.36**	-0.20**	-0.36**	-0.31**	-0.19**	-0.38**	-0.28**
NIÑO 1+2	0.12*	0.09	0.05	0.06	0.12	0.07	0.04
NIÑO 3	0.09	-0.01	0.02	0.05	0.01	0.08	-0.03
NIÑO 4	0.31**	0.18**	0.27**	0.26**	0.13*	0.34**	0.20**
NIÑO 3,4	0.19**	0.06	0.17**	0.17**	0.08	0.22**	0.08
WHWP	0.04	-0.09	-0.04	-0.06	0.04	0.05	-0.04
TNA	-0.09	-0.09	-0.15**	-0.14**	-0.03	-0.07	-0.09
TSA	-0.18**	-0.17**	-0.18**	-0.17**	-0.02	-0.14**	-0.09
AMO	0.06	-0.15**	-0.19**	-0.15**	-0.13*	-0.05	-0.02
MEI	0.38**	0.23**	0.37**	0.33**	0.25**	0.38**	0.27**
PNA	0.13*	0.11	0.14**	0.13*	0.12	0.17**	0.17**
WP	0.01	-0.02	0.00	0.02	0.03	0.05	-0.02
BEST	0.40**	0.23**	0.39**	0.34**	0.21**	0.42**	0.28**
TNI	-0.20**	-0.22**	-0.21**	-0.24**	0.02	-0.28**	-0.19**

A partir de la información anterior se identificaron los índices climáticos que mejor se relacionaron con el brillo solar, estos fueron el ONI, el MEI y el BEST, en la **Figura 4-36** se presentan los dos mejores. Se presentan correlaciones escasas o nulas con los índices NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, WHWP, TNA, TSA, AMO, PNA, WP y TNI; y débiles con el ONI, SOI, MEI y BEST. El brillo solar tiene correlación negativa con los índices SOI, WHWP, TNA, TSA y TNI; y correlación positiva con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, AMO, MEI, PNA, WP y BEST.

En la **Figura 4-34** se presenta la comparación entre el brillo solar de la estación Cenicafé y el índice ONI, para el periodo 1981 – 2010, en la cual se puede observar que al igual que la temperatura, el brillo solar en sus registros históricos aumenta cuando el ONI toma

valores positivos y disminuye cuando el ONI toma valores negativos. Los valores máximos de brillo solar y del ONI se manifiestan en el mismo tiempo.

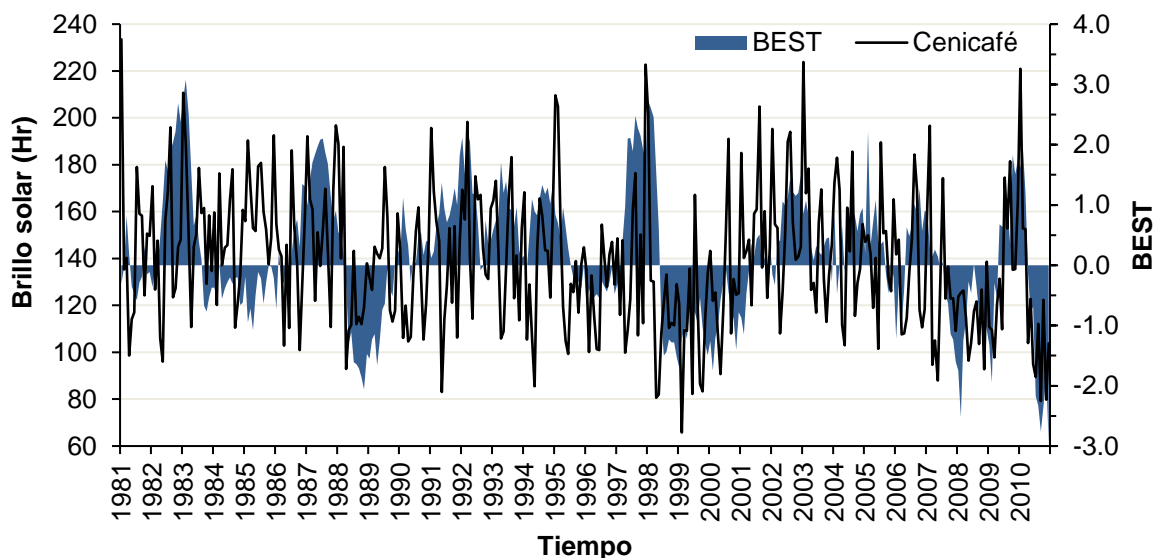
Figura 4-34: Comparación entre el brillo solar y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas marcan los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

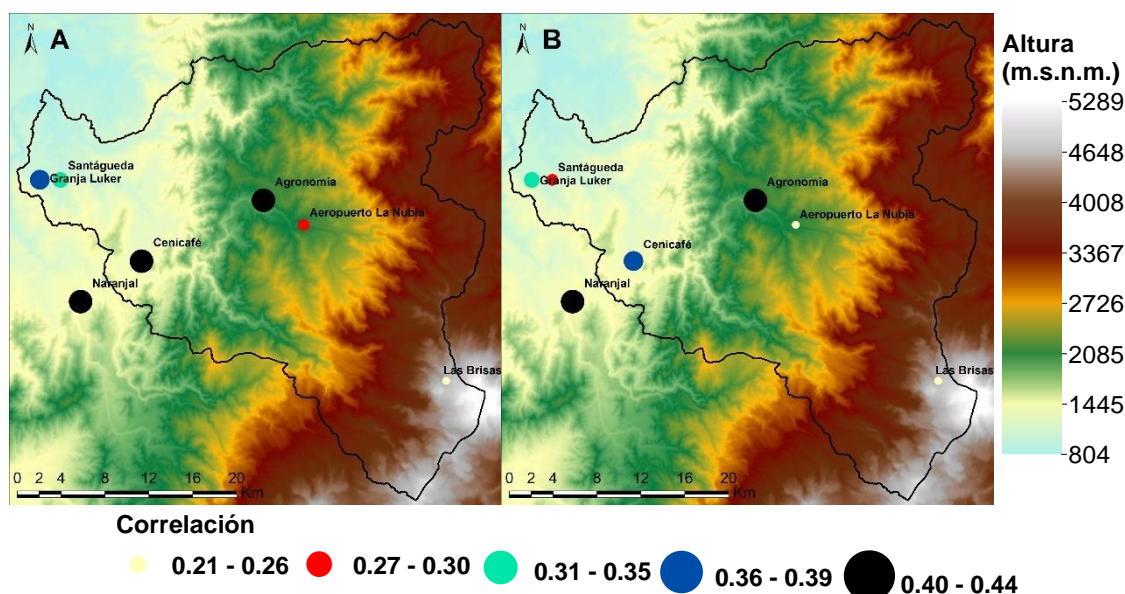
Al igual que el ONI, el índice BEST manifiesta una relación directa, en donde el brillo solar se incrementa cuando el índice también aumenta, como se puede observar en la **Figura 4-35**, el brillo solar presenta fluctuaciones a lo largo del tiempo sin embargo es posible observar que la tendencia de la variable sigue el comportamiento temporal del indicador.

Figura 4-35: Comparación entre el brillo solar y el índice BEST en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



En la **Figura 4-36** y del análisis de las correlaciones se puede decir que para la cuenca alta la relación entre el ONI (A), el BEST (B) y el brillo solar es débil a escasa, debido que para esta zona las correlaciones toman valores promedio de 0.22, por otro lado, las correlaciones mejoran en la cuenca media-baja con valores entre 0.40 - 0.44 (ONI) y 0.36 - 0.42 (BEST) , sin embargo, la correlación sigue siendo débil. La estación que mejor se correlacionó con los índices fue Naranjal con valores de 0.44 (ONI) y 0.42 (BEST). El ONI presenta mejores coeficientes respecto al BEST.

Figura 4-36: Correlaciones entre el brillo solar promediado cada 3 meses, el índice ONI (A) y BEST (B).



4.3.5 Correlaciones con el tiempo térmico

Utilizando el mismo análisis presentado en la sección 4.3.1, en el tiempo térmico los mejores resultados se obtuvieron con la variable promediada cada 3 meses (combinación 3), con un mejor ajuste cuando se considera un rezago de 1 mes al igual que en la temperatura. Si se comparan los resultados obtenidos entre las correlaciones de cada índice climático, el tiempo térmico mensual (combinación 1 ,ver **Tabla 4-13**) y la combinación 3 (ver **Tabla 4-14**) ,se puede observar que en general se logra un incremento en las mejores correlaciones de aproximadamente 0.1 para cada valor con esta última combinación.

Tabla 4-13: Correlaciones entre el tiempo térmico y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.49**	0.51**	0.63**	0.51**	0.48**	0.57**	0.49**
NAO	-0.02	-0.08	0.05	0.01	-0.19**	0.03	-0.02
PDO	0.30**	0.19**	0.34**	0.34**	0.28**	0.25**	0.21**
SOI	-0.33**	-0.35**	-0.48**	-0.37**	-0.34**	-0.42**	-0.33**
NIÑO 1+2	0.36**	0.31**	0.40**	0.43**	0.35**	0.38**	0.40**
NIÑO 3	0.51**	0.49**	0.54**	0.57**	0.59**	0.52**	0.53**
NIÑO 4	0.37**	0.48**	0.46**	0.37**	0.48**	0.47**	0.39**
NIÑO 3,4	0.51**	0.54**	0.58**	0.55**	0.62**	0.55**	0.52**
WHWP	0.30**	0.48**	0.31**	0.29**	0.52**	0.36**	0.42**
TNA	0.18**	0.39**	0.08	0.11*	0.43**	0.14**	0.29**
TSA	0.04	0.11	-0.08	-0.07	0.14*	-0.05	0.05
AMO	0.16**	0.28**	0.00	0.07	0.24**	0.12*	0.25**
MEI	0.46**	0.50**	0.62**	0.53**	0.51**	0.56**	0.47**
PNA	0.20**	0.17**	0.21**	0.21**	0.19**	0.19**	0.23**
WP	0.07	0.12*	0.10*	0.05	0.07	0.10*	0.09
BEST	0.45**	0.48**	0.60**	0.48**	0.45**	0.54**	0.45**
TNI	-0.21**	-0.27**	-0.29**	-0.16**	-0.21**	-0.30**	-0.17**

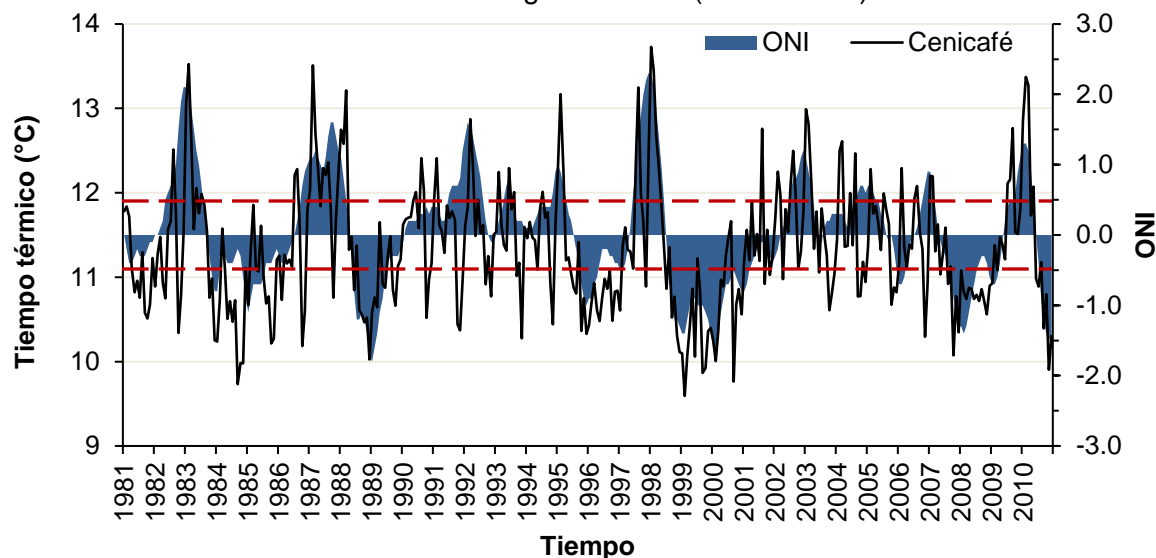
Tabla 4-14: Correlaciones entre el tiempo térmico promediado cada 3 meses y los índices climáticos con rezago de 1 mes.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.59**	0.60**	0.75**	0.62**	0.56**	0.67**	0.59**
NAO	0.00	0.00	0.12*	0.07	-0.09	0.07	0.04
PDO	0.28**	0.14*	0.34**	0.35**	0.33**	0.28**	0.19**
SOI	-0.40**	-0.38**	-0.55**	-0.42**	-0.36**	-0.49**	-0.36**
NIÑO 1+2	0.47**	0.40**	0.51**	0.60**	0.50**	0.48**	0.51**
NIÑO 3	0.60**	0.57**	0.64**	0.68**	0.67**	0.60**	0.60**
NIÑO 4	0.48**	0.57**	0.59**	0.45**	0.48**	0.58**	0.47**
NIÑO 3,4	0.61**	0.64**	0.70**	0.65**	0.64**	0.66**	0.59**
WHWP	0.32**	0.47**	0.30**	0.28**	0.46**	0.35**	0.41**
TNA	0.19**	0.38**	0.05	0.10	0.40**	0.21**	0.28**
TSA	0.03	0.14*	-0.10	-0.04	0.19**	0.01	0.06
AMO	0.18**	0.36**	0.00	0.09	0.26**	0.21**	0.29**
MEI	0.52**	0.53**	0.71**	0.60**	0.54**	0.62**	0.54**
PNA	0.19**	0.18**	0.20**	0.23**	0.21**	0.20**	0.23**
WP	0.08	0.14*	0.11*	0.05	0.09	0.12*	0.10
BEST	0.55**	0.54**	0.71**	0.57**	0.50**	0.64**	0.53**
TNI	-0.19**	-0.27**	-0.29**	-0.15**	-0.19**	-0.23**	-0.17**

Los mejores valores de correlación entre los índices climáticos y el tiempo térmico se lograron para los índices ONI, Niño 3 y Niño 3,4, con valores máximos de 0.75, 0.68 y 0.7 respectivamente. En la **Figura 4-40**, se presenta el comportamiento del tiempo térmico con estos índices. Se obtuvieron correlaciones escasas o nulas con: NAO, TSA, AMO, PNA, WP y TNI; débiles con: PDO, SOI, WHWP y TNA; y moderadas a fuertes con: ONI, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, MEI y BEST. El tiempo térmico, tiene correlación negativa con los índices SOI y TNI; y correlación positiva con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4 y 3,4, WHWP, TNA, TSA, AMO, MEI, PNA, WP y BEST.

En la **Figura 4-37** se presenta la comparación entre el TT de la estación Cenicafé y el índice ONI, para el periodo 1981 – 2010, en la cual se puede observar que en general a lo largo del tiempo si el ONI toma valores positivos, el TT aumenta, igualmente sucede cuando el ONI toma valores negativos donde la variable disminuye. Para los valores más altos del ONI se presentan los registros más altos de tiempo térmico correspondientes a 13.5°C en febrero de 1983 y 13.7°C en enero de 1998.

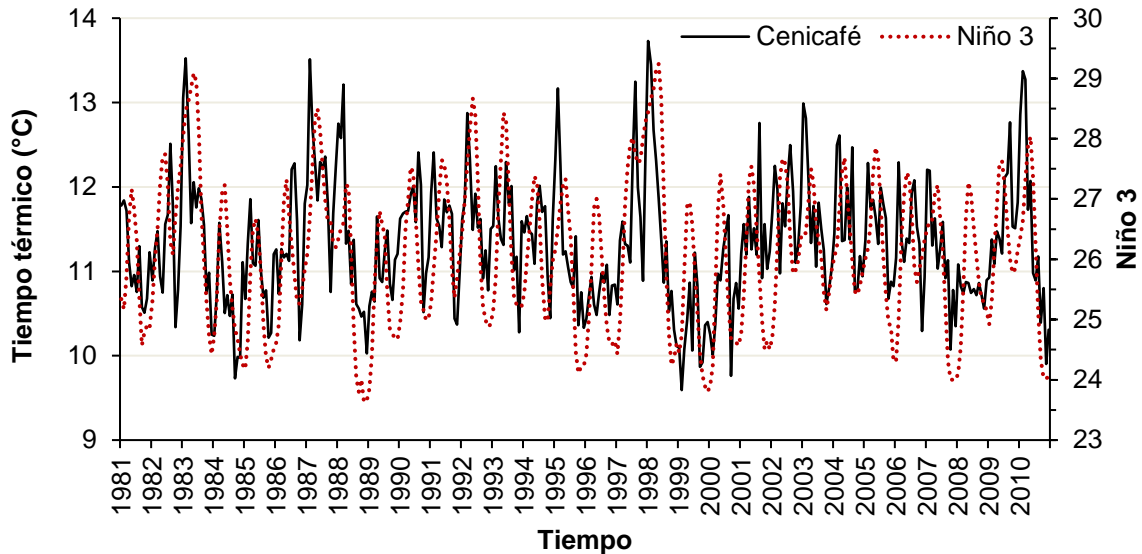
Figura 4-37: Comparación entre el tiempo térmico y el índice ONI en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas indican los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

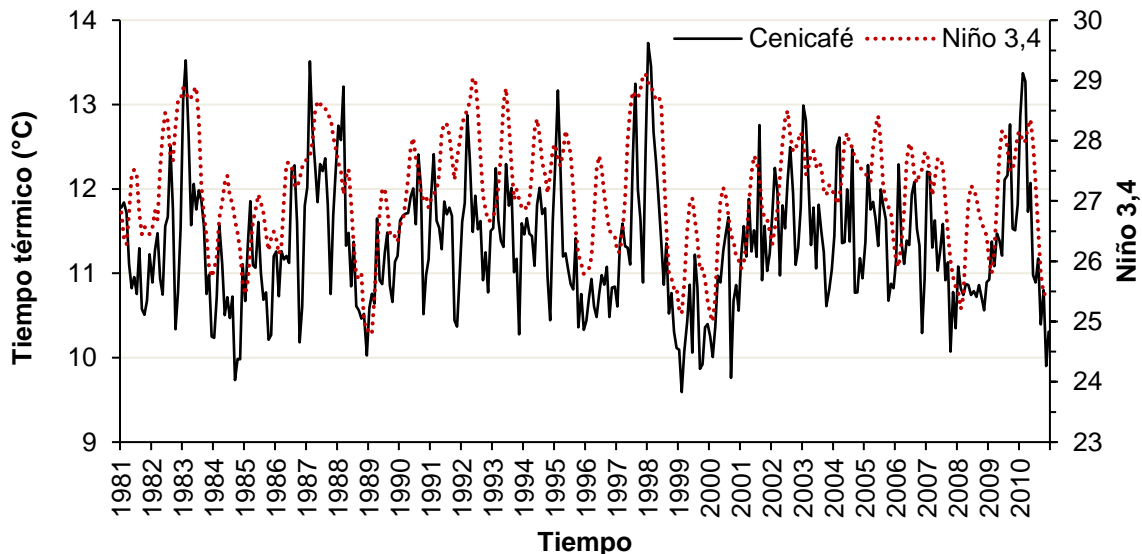
En la **Figura 4-38**, se puede observar que la serie tanto de TT como del índice Niño 3, presentan las mismas tendencias de aumentar o disminuir a través de los años con una pequeña variación en los extremos en especial cuando el índice Niño 3 toma valores mínimos.

Figura 4-38: Comparación entre el tiempo térmico y el índice Niño 3 en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).

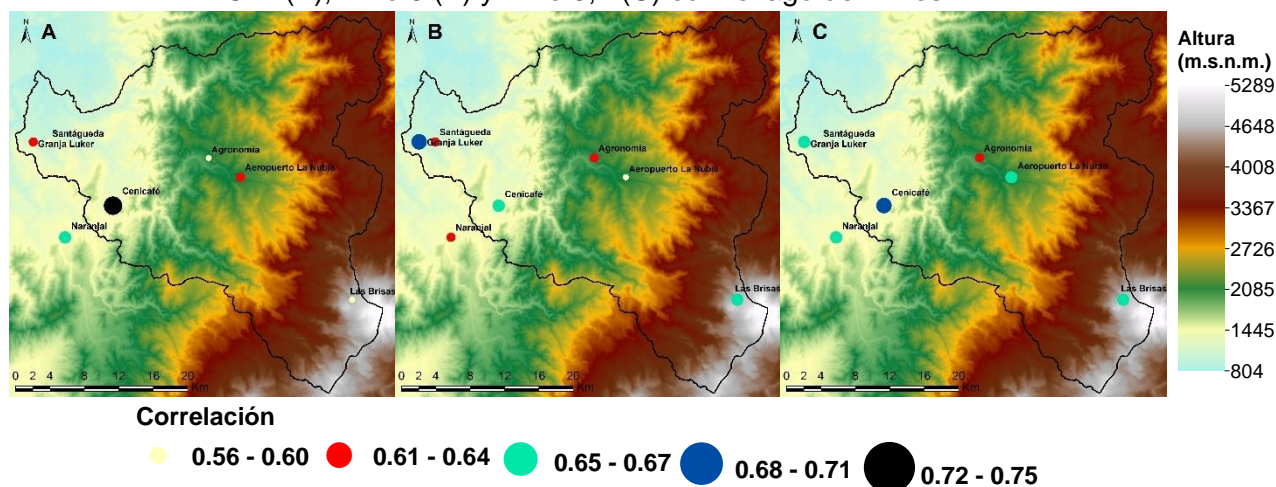


Al igual que con los índices anteriores, el TT y el índice Niño 3,4 tienen relación, ambas series varían similarmente a largo de los años, con correspondencia de sus máximos, como se observa en la **Figura 4-39**.

Figura 4-39: Comparación entre el tiempo térmico y el índice Niño 3,4 en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).



Al realizar el análisis espacial se encontró que las correlaciones entre el ONI y el TT no evidencian una relación con la altitud, presenta valores positivos entre 0.56 para la estación las Brisas y 0.75 para la estación de Cenicafé, estos coeficientes manifiestan en general una correlación positiva moderada a fuerte para toda la cuenca, ver **Figura 4-40** (A).

Figura 4-40: Correlaciones entre el tiempo térmico promediado cada 3 meses, el índice ONI (A), Niño 3 (B) y Niño 3,4 (C) con rezago de 1 mes.

Se destaca el índice Niño 3 (B) ya que presenta mejores correlaciones en la cuenca baja y alta, al contrario que el ONI (A). Para la cuenca alta toma valores promedio de 0.66 y en la cuenca baja de 0.69. En el índice Niño 3,4 (C), los coeficientes son más cercanos con valores entre 0.59 y 0.70. En general no se presenta una relación de las correlaciones con la altitud.

4.3.6 Correlaciones con la amplitud térmica

Utilizando el mismo análisis presentado en la sección 4.3.1, en la amplitud térmica los mejores resultados se obtuvieron con la variable promediada cada 3 meses (combinación 3), con un mejor ajuste cuando se considera un rezago de 1 mes al igual que en el tiempo térmico. Comparando las correlaciones de cada índice climático y la amplitud térmica (combinación 1, ver **Tabla 4-15**) con la combinación 3 (ver **Tabla 4-16**), se puede observar una mejora en los valores de las correlaciones.

Tabla 4-15: Correlaciones entre la amplitud térmica y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.37**	0.18**	0.35**	0.36**	0.14	0.39**	0.35**
NAO	0.11	0.18**	0.02	0.10	-0.11	0.10	0.12*
PDO	0.33**	0.21**	0.06	0.28**	-0.02	0.24**	0.28**
SOI	-0.36**	-0.11	-0.25**	-0.32**	-0.09	-0.33**	-0.32**
NIÑO 1+2	0.14*	0.36**	0.08	0.16**	0.04	0.09	0.18**
NIÑO 3	0.12*	0.23**	0.12*	0.15**	0.02	0.11*	0.14**
NIÑO 4	0.24**	-0.07	0.30**	0.17**	0.13	0.27**	0.16**
NIÑO 3,4	0.18**	0.08	0.19**	0.17**	0.04	0.20**	0.16**
WHWP	-0.05	-0.02	0.21**	-0.03	0.21**	0.04	0.01

TNA	-0.09	-0.16*	0.20**	-0.11*	0.30**	-0.08	-0.10
TSA	-0.11*	-0.08	-0.03	-0.13*	0.16*	-0.11*	-0.21**
AMO	-0.12*	-0.24**	0.36**	-0.19**	0.36**	-0.07	-0.22**
MEI	0.33**	0.16*	0.26**	0.33**	0.12	0.36**	0.34**
PNA	0.11*	0.09	0.17**	0.15**	0.17*	0.13*	0.15**
WP	-0.05	0.01	0.02	-0.01	-0.05	0.04	0.02
BEST	0.39**	0.14*	0.33**	0.34**	0.15	0.37**	0.35**
TNI	-0.19**	0.23**	-0.28**	-0.10	-0.18*	-0.23**	-0.08

Tabla 4-16: Correlaciones entre la amplitud térmica promediada cada 3 meses y los índices climáticos con rezago de 1 mes.

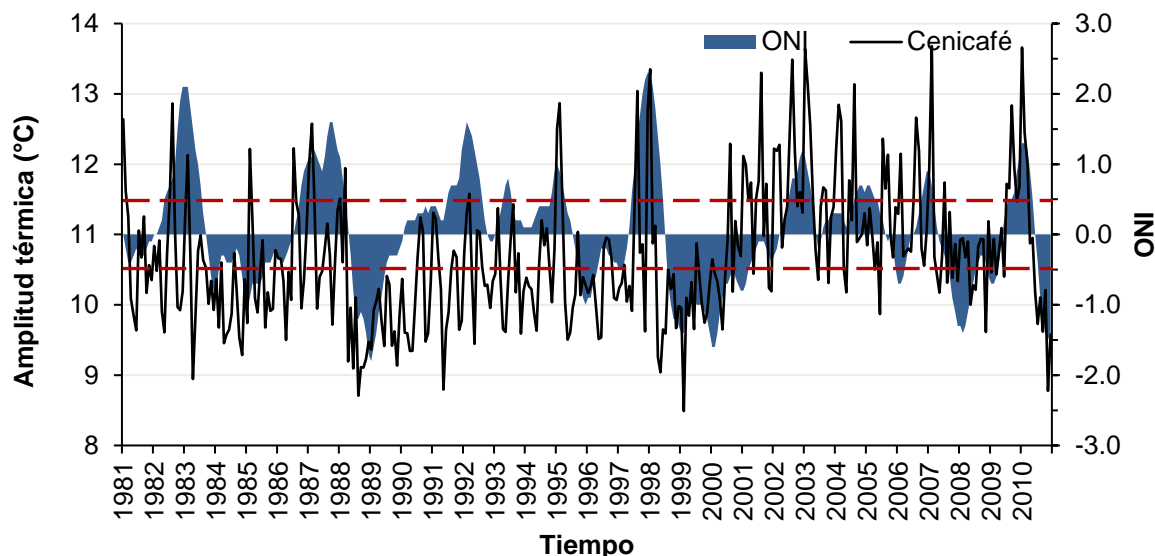
	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	0.42**	0.22**	0.42**	0.47**	0.19*	0.51**	0.45**
NAO	0.06	0.19**	-0.01	0.10	-0.07	0.08	0.13*
PDO	0.31**	0.19**	0.01	0.30**	-0.03	0.26**	0.27**
SOI	-0.37**	-0.15*	-0.27**	-0.38**	-0.11	-0.39**	-0.37**
NIÑO 1+2	0.03	0.33**	0.03	0.14**	0.06	0.10	0.17**
NIÑO 3	0.06	0.21**	0.14**	0.18**	0.09	0.18**	0.18**
NIÑO 4	0.38**	0.03	0.47**	0.34**	0.31**	0.45**	0.33**
NIÑO 3,4	0.22**	0.14*	0.30**	0.31**	0.15*	0.36**	0.30**
WHWP	-0.03	-0.05	0.25**	-0.01	0.25**	0.06	0.05
TNA	-0.10	-0.20**	0.21**	-0.16**	0.35**	-0.15**	-0.16**
TSA	-0.18**	-0.19**	-0.09	-0.20**	0.11	-0.17**	-0.29**
AMO	-0.12*	-0.30**	0.43**	-0.23**	0.48**	-0.07	-0.25**
MEI	0.38**	0.22**	0.33**	0.46**	0.16*	0.48**	0.45**
PNA	0.03	0.11	0.12*	0.09	0.14	0.08	0.12*
WP	-0.02	0.06	0.03	-0.01	0.04	0.05	0.03
BEST	0.41**	0.19**	0.39**	0.44**	0.18*	0.48**	0.44**
TNI	-0.21**	0.26**	-0.33**	-0.11*	-0.25**	-0.26**	-0.07

El ONI, el MEI y el BEST corresponden a los índices que mejor se relacionan con la amplitud térmica en la cuenca del río Chinchiná, con valores máximos de 0.51, 0.48 y 0.48 respectivamente. Se presentan correlaciones escasas o nulas con los índices NAO, PDO, Niño 1+2, Niño 3, WHWP, TNA, TSA, PNA y WP; y débiles con: ONI, SOI, Niño 4, Niño 3,4, AMO, MEI, BEST y TNI. La AT tiene correlación negativa con los índices SOI, TNA, TSA, AMO y TNI; y correlación positiva con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, WHWP, MEI, PNA, WP y BEST.

Comparando la AT con el índice ONI, para el periodo 1981 – 2010, se observó que en general cuando aumenta el ONI la AT también lo hace, y cuando disminuye el ONI la AT

disminuye. Esta relación entre el índice ONI y la AT, se presenta en todas las estaciones y se aprecia en la **Figura 4-41** para la estación Cenicafé.

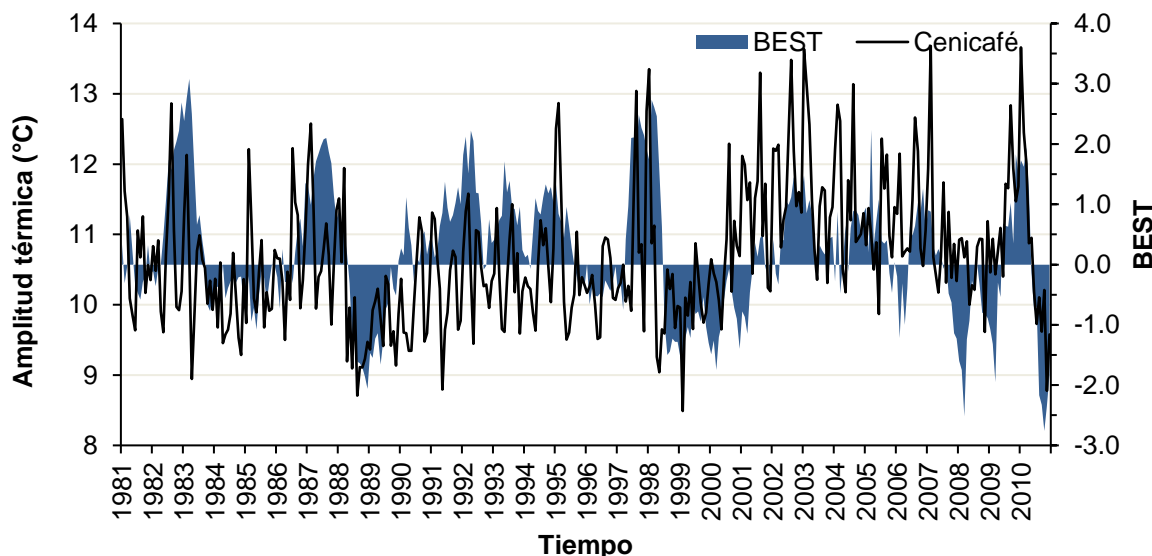
Figura 4-41: Comparación entre la amplitud térmica y el índice ONI en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas indican los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

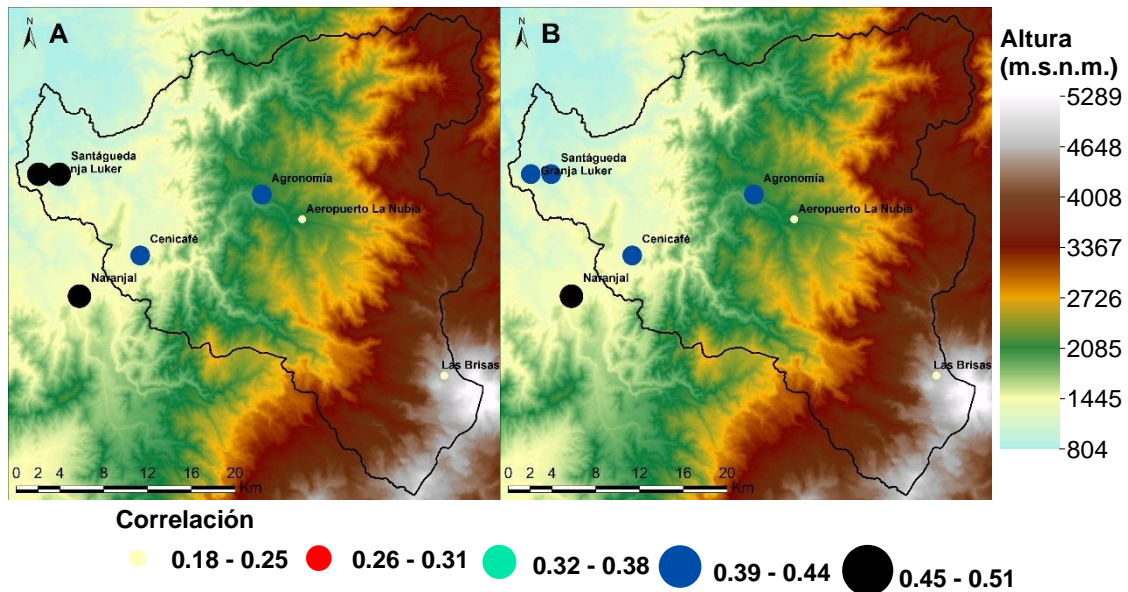
En la **Figura 4-42**, se puede observar que las series tanto de AT como del índice BEST, presentan las mismas tendencias de aumentar o disminuir a través del tiempo, con los máximos coincidiendo en general.

Figura 4-42: Comparación entre la amplitud térmica y el índice BEST en la estación Cenicafé con rezago de 1 mes (1981 - 2010).



Al realizar el análisis espacial se encontró que las correlaciones entre el ONI (A), el BEST (B) vs. la AT promediada cada 3 meses evidencian una relación con la altitud, presentando valores mayores en la parte baja de la cuenca y disminuyendo a medida que se desplaza hacia la cuenca alta (ver **Figura 4-43**). Las relaciones en la cuenca alta son escasas con valores de 0.19 (ONI) y 0.18 (BEST), en la cuenca media son débiles oscilando entre 0.20 y 0.42, y en la cuenca baja débiles a moderadas, con los mejores valores en la estación Naranjal, 0.51 (ONI) y 0.48 (BEST). Los mejores resultados los presenta el ONI.

Figura 4-43: Correlaciones entre la amplitud térmica promediada cada 3 meses, el índice ONI (A) y el BEST (B), con rezago de 1 mes.



4.3.7 Correlaciones con el déficit de brillo solar

Utilizando el mismo análisis presentado en la sección 4.3.1, los resultados de las correlaciones entre los índices climáticos y el déficit de brillo solar presentes en la **Tabla 4-17** y en la **Tabla 4-18**, presentaron mejores resultados promediando la variable cada 3 meses (combinación 3). Sin embargo, para los índices con los valores más altos de correlación no siempre la respuesta fue igual, en el caso del ONI y el BEST la mejor respuesta es inmediata, índices como el Niño 1+2 y Niño 3 presentaron mejores valores con un rezago de 3 meses, mientras que en el Niño 4 y Niño 3,4 son mejores los valores con un rezago de 2 meses.

Tabla 4-17: Correlaciones entre el déficit de brillo solar y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	-0.31**	-0.20**	-0.30**	-0.26**	-0.14*	-0.32**	-0.22**
NAO	-0.13*	-0.09	-0.09	-0.08	-0.01	-0.08	-0.10
PDO	-0.12*	-0.03	-0.19**	-0.15**	-0.07	-0.17**	-0.12*
SOI	0.28**	0.15*	0.29**	0.24**	0.14*	0.31**	0.20**
NIÑO 1+2	-0.11*	-0.23**	-0.10	-0.12*	0.00	-0.11*	-0.10

NIÑO 3	-0.05	-0.08	-0.02	-0.05	-0.07	-0.05	0.03
NIÑO 4	-0.18**	-0.04	-0.15**	-0.12*	-0.12	-0.19**	-0.09
NIÑO 3,4	-0.09	-0.03	-0.07	-0.08	-0.12*	-0.11*	-0.01
WHWP	0.08	0.10	0.07	0.10	0.09	0.00	0.07
TNA	0.11	0.12*	0.15**	0.13*	0.15*	0.09	0.09
TSA	0.13*	-0.01	0.15**	0.12*	0.06	0.09	0.05
AMO	0.04	0.10	0.17**	0.12*	0.09	0.05	0.02
MEI	-0.27**	-0.16**	-0.26**	-0.22**	-0.11	-0.26**	-0.17**
PNA	-0.06	-0.12*	-0.11*	-0.10	0.06	-0.12*	-0.11*
WP	0.00	-0.05	0.01	0.01	0.04	-0.04	0.04
BEST	-0.30**	-0.17**	-0.29**	-0.25**	-0.14*	-0.32**	-0.20**
TNI	0.18**	-0.01	0.16**	0.19**	0.19**	0.21**	0.15**

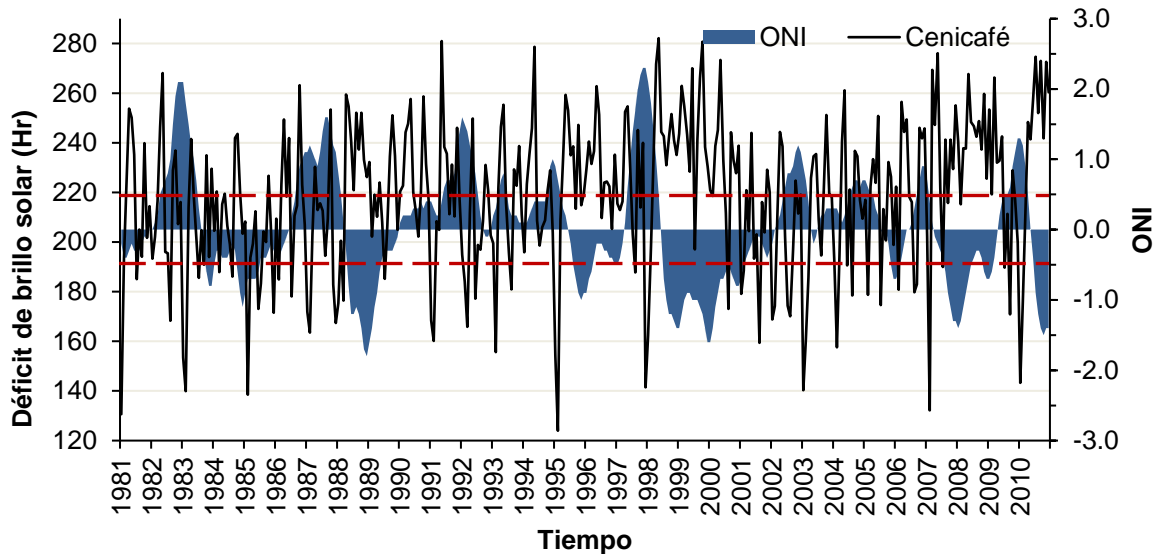
Tabla 4-18: Correlaciones entre el déficit de brillo solar promediado cada 3 meses y los índices climáticos.

	Agronomía	Aeropuerto La Nubia	Cenicafé	Granja Luker	Las Brisas	Naranjal	Santágueda
ONI	-0.40**	-0.26**	-0.40**	-0.37**	-0.17**	-0.43**	-0.31**
NAO	-0.16**	-0.15**	-0.14**	-0.13*	-0.11	-0.11*	-0.15**
PDO	-0.16**	-0.04	-0.27**	-0.20**	-0.09	-0.23**	-0.18**
SOI	0.33**	0.17**	0.35**	0.30**	0.17**	0.37**	0.27**
NIÑO 1+2	-0.12*	-0.33**	-0.13*	-0.16**	-0.01	-0.16**	-0.15**
NIÑO 3	-0.08	-0.16**	-0.07	-0.10	-0.12*	-0.13*	-0.02
NIÑO 4	-0.26**	-0.05	-0.24**	-0.21**	-0.15*	-0.30**	-0.16**
NIÑO 3,4	-0.16**	-0.09	-0.16**	-0.16**	-0.18**	-0.22**	-0.07
WHWP	0.12*	0.11	0.07	0.09	0.15**	-0.03	0.06
TNA	0.13*	0.15**	0.16**	0.15**	0.17**	0.08	0.09
TSA	0.18**	0.01	0.17**	0.16**	0.07	0.12*	0.08
AMO	0.05	0.14*	0.19**	0.16**	0.12*	0.05	0.02
MEI	-0.35**	-0.21**	-0.36**	-0.32**	-0.12*	-0.36**	-0.25**
PNA	-0.07	-0.12*	-0.14**	-0.13*	0.05	-0.17**	-0.17**
WP	-0.02	-0.05	0.01	-0.01	-0.02	-0.05	0.02
BEST	-0.37**	-0.21**	-0.38**	-0.34**	-0.18**	-0.42**	-0.28**
TNI	0.22**	-0.07	0.20**	0.22**	0.22**	0.26**	0.17**

Los mejores resultados de las correlaciones del DBS se dan con el índice ONI y el BEST, siendo estos los mejores junto con el MEI. Se presentaron correlaciones escasas o nulas con los índices NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, WHWP, TNA, TSA, AMO, PNA, WP y TNI; y débiles con: ONI, SOI, MEI y BEST. Tiene correlación negativa con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4, 3,4, MEI, PNA, WP y BEST; y correlación positiva con los índices SOI, WHWP, TNA, TSA, AMO y TNI.

En la **Figura 4-44** se presenta la comparación entre el déficit de brillo solar de la estación Cenicafé y el índice ONI, para el periodo 1981 – 2010, en ésta se aprecia que el DBS tiende a disminuir cuando el ONI toma valores positivos (fase cálida), y aumenta cuando el ONI toma valores negativos (fase fría).

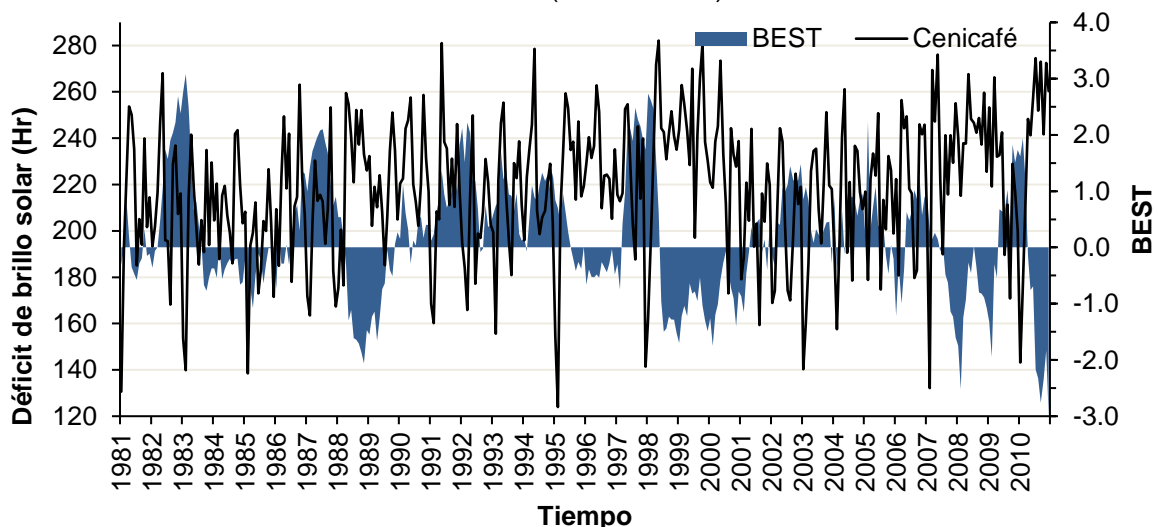
Figura 4-44: Comparación entre el déficit de brillo solar y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas marcan los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

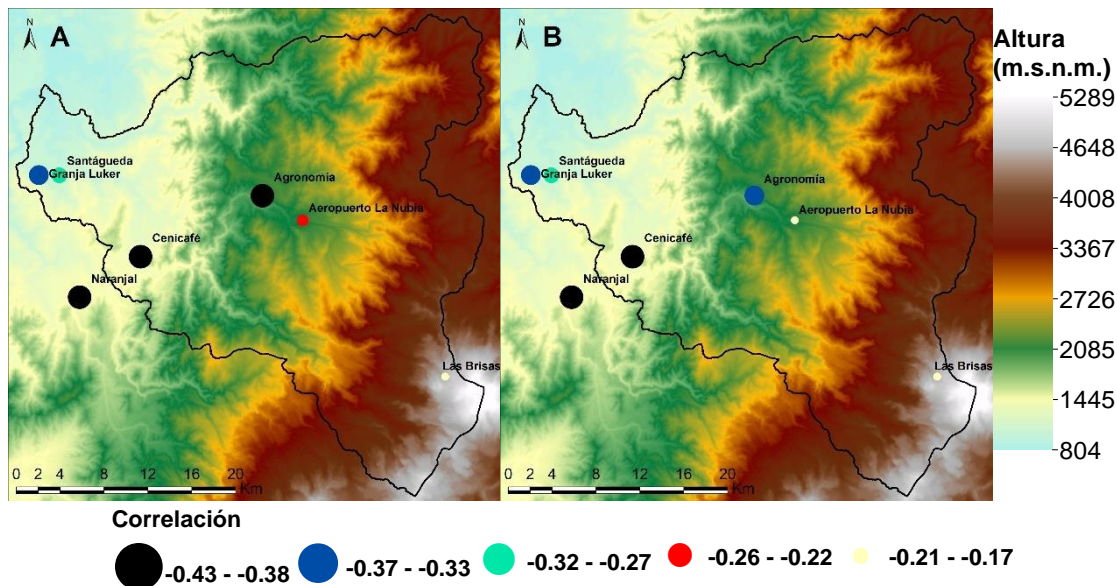
Al igual que con el ONI, el índice BEST manifiesta una relación inversa, en donde el déficit de brillo solar se incrementa cuando el índice disminuye, como se puede observar en la **Figura 4-45**, el DBS presenta fluctuaciones a lo largo del tiempo, sin embargo, es posible observar que la tendencia de la variable sigue el comportamiento temporal del índice.

Figura 4-45: Comparación entre el déficit de brillo solar y el índice BEST en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



Analizando los resultados espacialmente se puede decir que no existe una relación clara con la altitud, se presentan relaciones escasas y débiles tanto en la parte baja de la cuenca como en la cuenca alta, con el índice ONI (A) y el BEST (B), con valores entre -0.17 a -0.21 en la parte alta y en la parte baja valores entre -0.27 a -0.37. La estación con la mejor correlación es Naranjal con valores de -0.43 con el ONI y -0.42 con el BEST.

Figura 4-46: Correlaciones entre el déficit de brillo solar promediado cada 3 meses y el índice ONI (A) y BEST (B).



4.3.8 Correlaciones con el índice estandarizado de precipitación

En la **Tabla 4-19** se presentan los coeficientes de correlación de Spearman entre el índice estandarizado de precipitación con periodos de 1, 3, 6, 12 y 24 meses, y los índices climáticos para la estación Cenicafé. La mejor relación entre la mayoría de índices climáticos y el SPI se da con un periodo de 6 y 12 meses.

Tabla 4-19: Correlaciones entre el SPI en la estación Cenicafé para diferentes periodos y los índices climáticos.

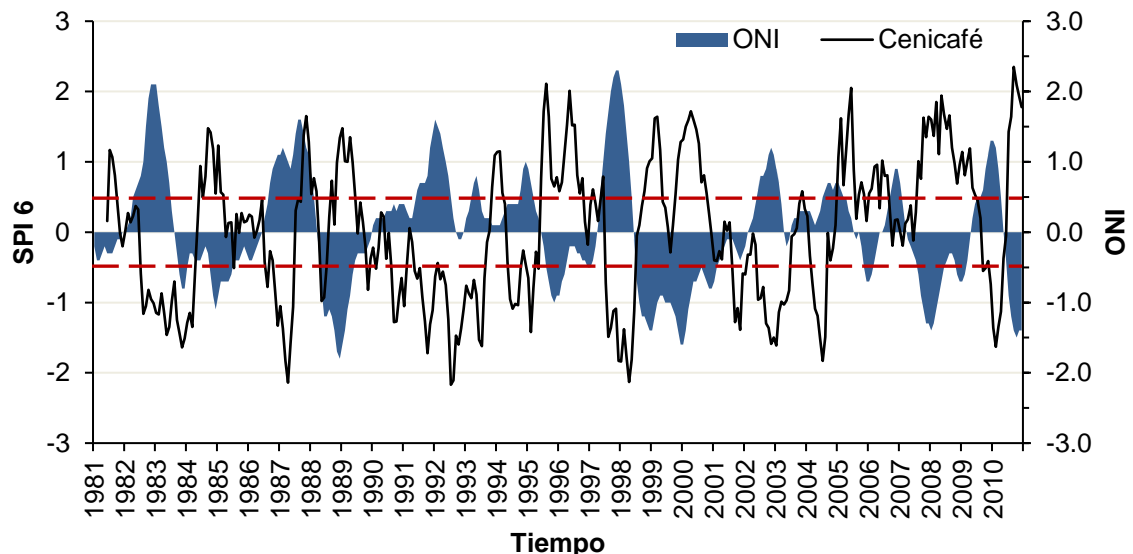
	1 mes	3 meses	6 meses	12 meses	24 meses
ONI	-0.35**	-0.53**	-0.59**	-0.59**	-0.37**
NAO	-0.03	-0.04	-0.04	-0.06	-0.09
PDO	-0.16**	-0.26**	-0.34**	-0.42**	-0.43**
SOI	0.31**	0.48**	0.54**	0.52**	0.39**
NIÑO 1+2	-0.10	-0.15**	-0.18**	-0.20**	-0.09
NIÑO 3	-0.21**	-0.28**	-0.31**	-0.32**	-0.15**
NIÑO 4	-0.27**	-0.42**	-0.48**	-0.49**	-0.28**
NIÑO 3,4	-0.29**	-0.43**	-0.49**	-0.49**	-0.28**

WHWP	-0.10	-0.15**	-0.17**	-0.26**	-0.08
TNA	0.13*	0.12*	0.06	0.05	0.17**
TSA	0.21**	0.30**	0.25**	0.14**	0.13*
AMO	0.11*	0.16**	0.20**	0.24**	0.33**
MEI	-0.34**	-0.53**	-0.61**	-0.64**	-0.43**
PNA	-0.06	-0.12*	-0.12*	-0.15**	-0.09
WP	-0.08	-0.01	-0.08	-0.05	-0.06
BEST	-0.34**	-0.52**	-0.57**	-0.56**	-0.37**
TNI	0.11*	0.18**	0.21**	0.19**	0.19**

Se presentan correlaciones escasas o nulas con los índices NAO, Niño 1+2, Niño 3, WHWP, TNA, TSA, AMO, PNA, WP y TNI; y débiles con el ONI, PDO, SOI, Niño 4, Niño 3,4, MEI y BEST. El SPI tiene correlación negativa con los índices ONI, NAO, PDO, Niño 1+2, 3, 4 y 3,4, WHWP, MEI, PNA, WP y BEST; y correlación positiva con los índices SOI, TNA, TSA, AMO y TNI.

En las figuras 4-47, 4-48, 4-49 y 4-50, se presentan las comparaciones entre el SPI con periodos de 6 y 12 meses, y los índices con mejor correlación para la estación Cenicafé, el ONI y el MEI. Se observa claramente la relación inversa entre los índices, cuando el ONI o el MEI presentan valores positivos, en el SPI son negativos, así mismo, cuando se alcanzan valores negativos en los índices, el SPI es positivo. Los valores máximos concuerdan muy bien en todos los casos y se mantiene la misma tendencia.

Figura 4-47: Comparación entre el SPI 6 meses y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas marcan los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

Figura 4-48: Comparación entre el SPI 6 meses y el índice MEI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).

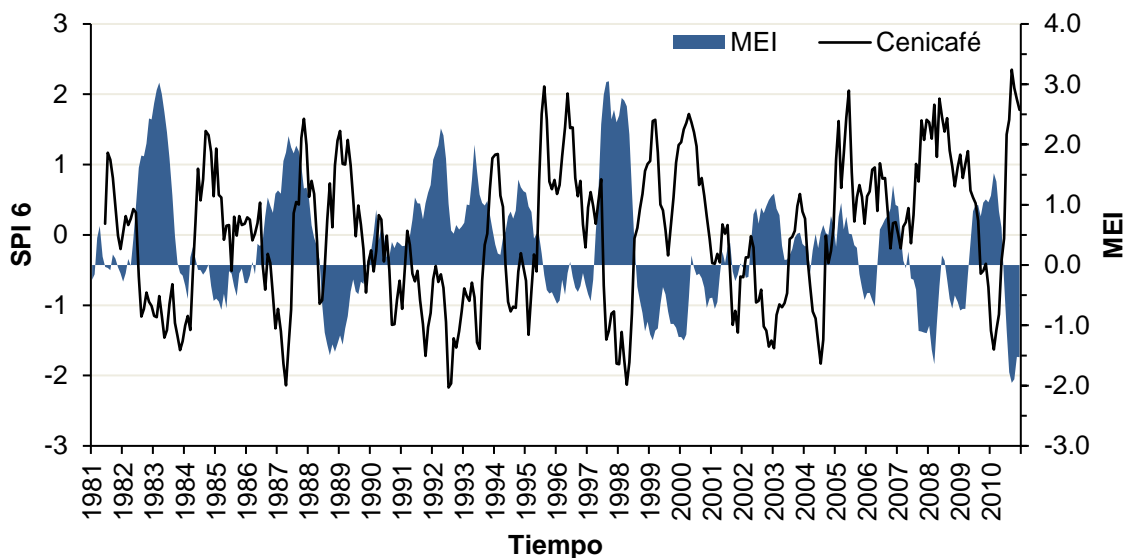
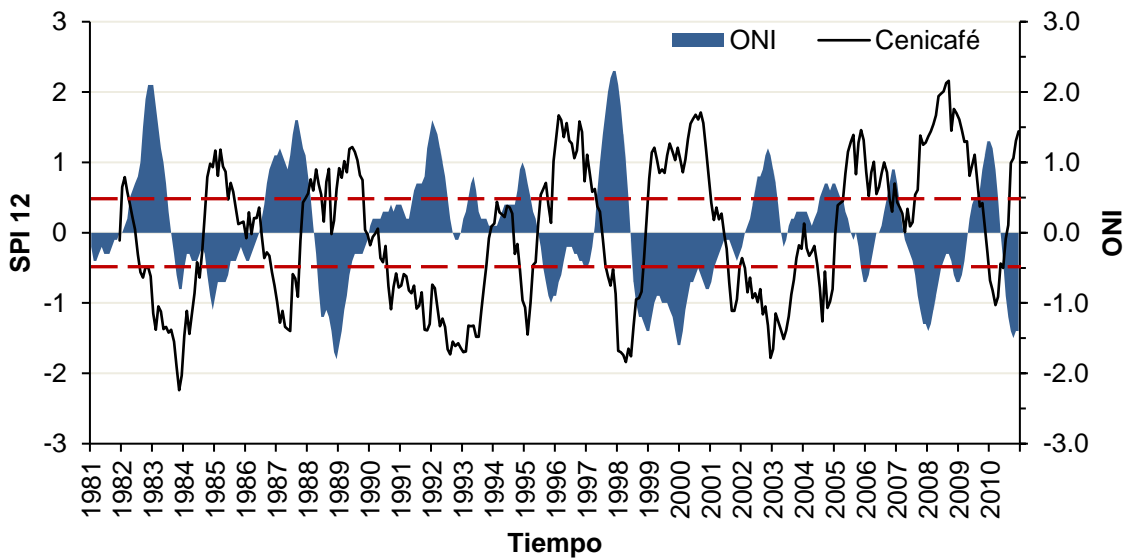
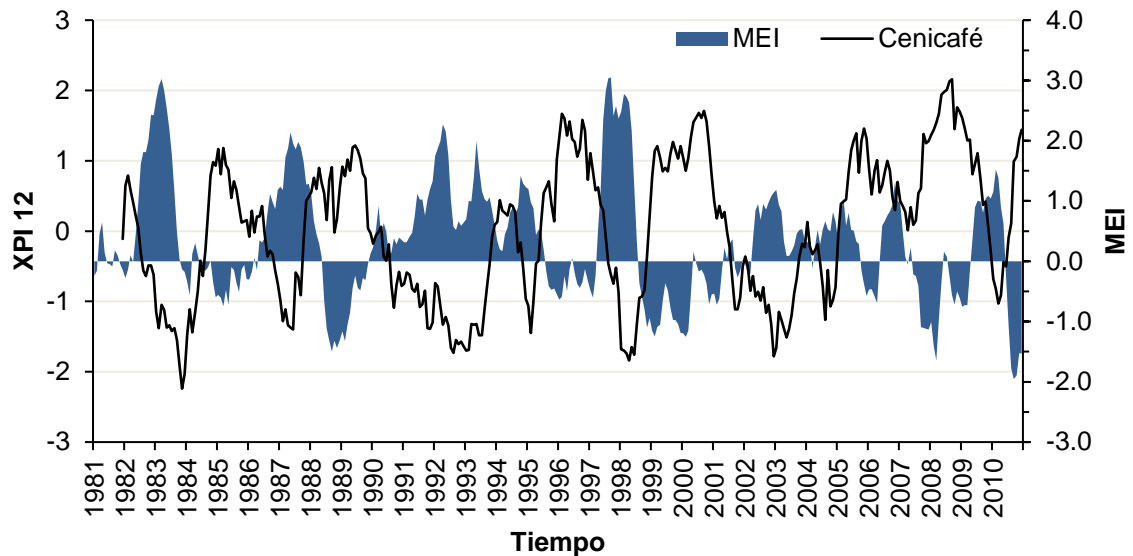


Figura 4-49: Comparación entre el SPI 12 meses y el índice ONI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



Las líneas rojas discontinuas marcan los límites +0.5 y -0.5 considerados en el ONI para determinar las fases El Niño y La Niña, respectivamente.

Figura 4-50: Comparación entre el SPI 12 meses y el índice MEI en la estación Cenicafé (1981 - 2010).



En la **Figura 4-51** se pueden observar las representaciones gráficas de los resultados obtenidos en todas las estaciones correlacionadas con los índices ONI (A), MEI (B) y el SPI en periodos de 6 meses y en la **Figura 4-52** para el SPI de 12 meses. El comportamiento de las correlaciones en estos casos es muy similar, no se alcanza a distinguir muy bien una relación asociada con la elevación, sin embargo, los coeficientes de correlación más altos siempre se presentan en la parte baja de la cuenca.

Figura 4-51: Correlaciones entre el SPI 6 meses, el índice ONI (A) y el MEI (B).

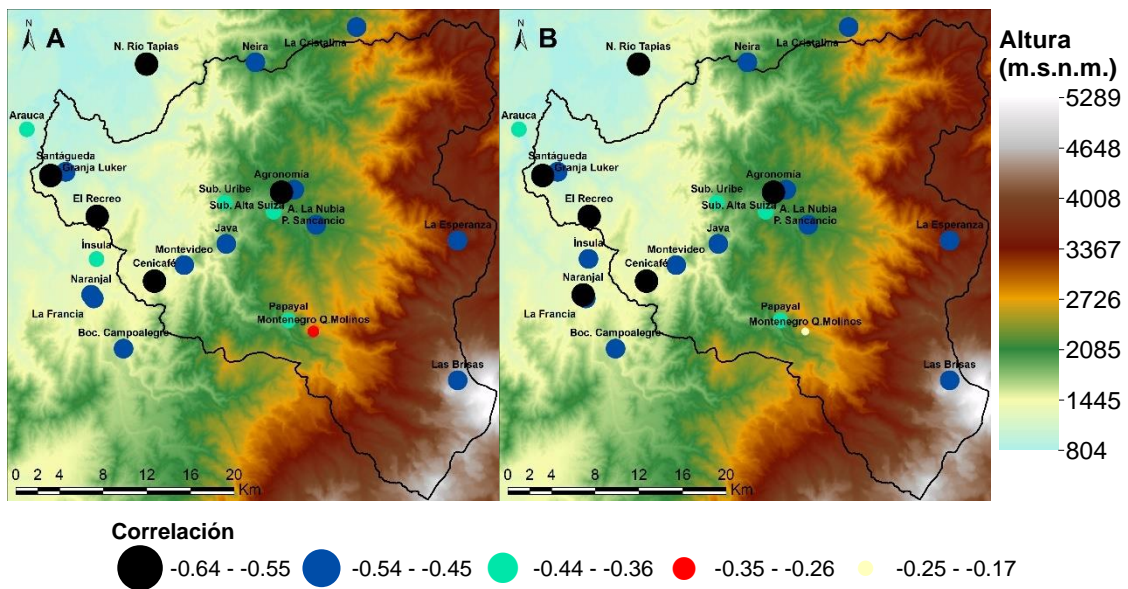
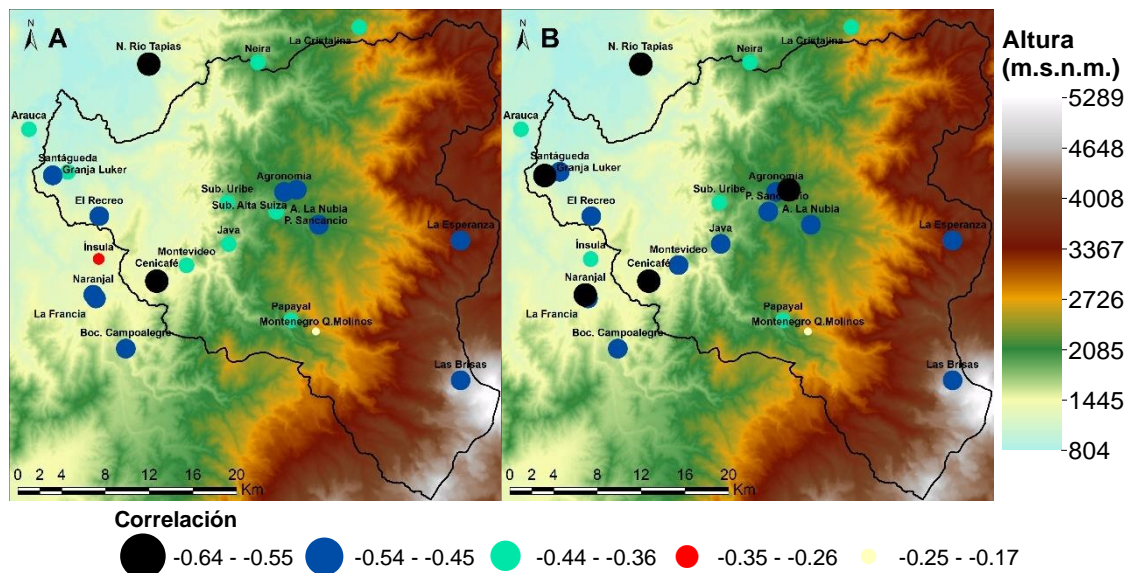


Figura 4-52: Correlaciones entre el SPI 12 meses, el índice ONI (A) y el MEI (B).

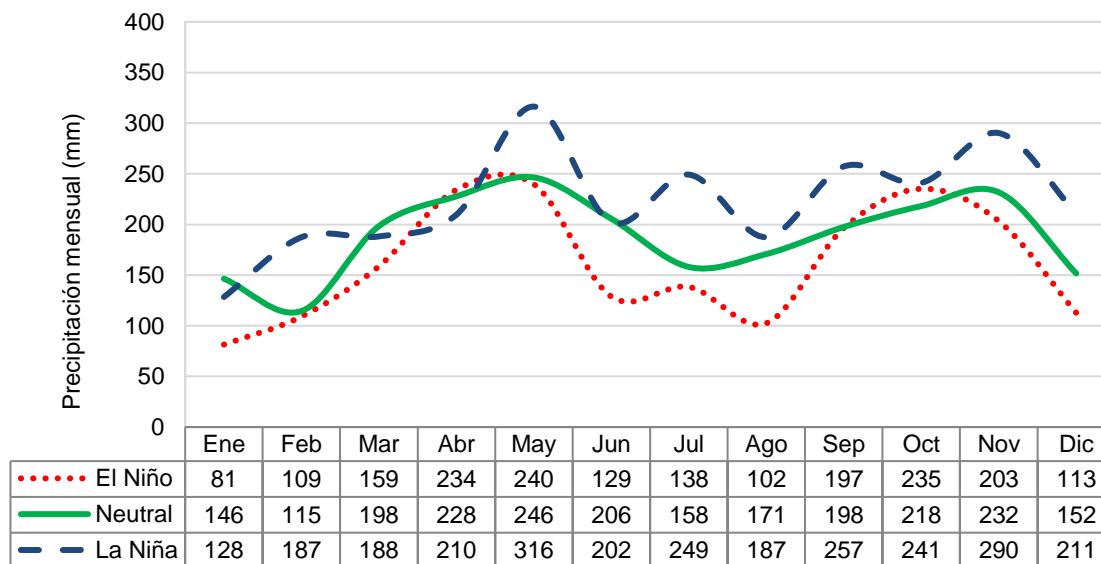
4.4 Análisis con el ENSO

Se realizó el análisis por condición hidrológica con el fin de evaluar los efectos del ENSO en cada una de las estaciones dentro de la investigación. Se tomó el índice ONI para clasificar las fases El Niño, La Niña y Neutral, ya que fue el índice que mejores correlaciones presentó para cada una de las variables y de los índices agroclimáticos. Se mantiene el criterio utilizado por la NOAA a nivel internacional y adaptado a nivel nacional por el IDEAM de definir la fase del ENSO y clasificación de un año si se tienen 5 meses seguidos con anomalías por encima de 0.5 o por debajo de -0.5. Y se partió de la clasificación presentada mensualmente por parte de la NOAA en donde se diferencian los meses en el ONI clasificados como El Niño, La Niña y Neutral.

4.4.1 Relación de la precipitación con el ENSO

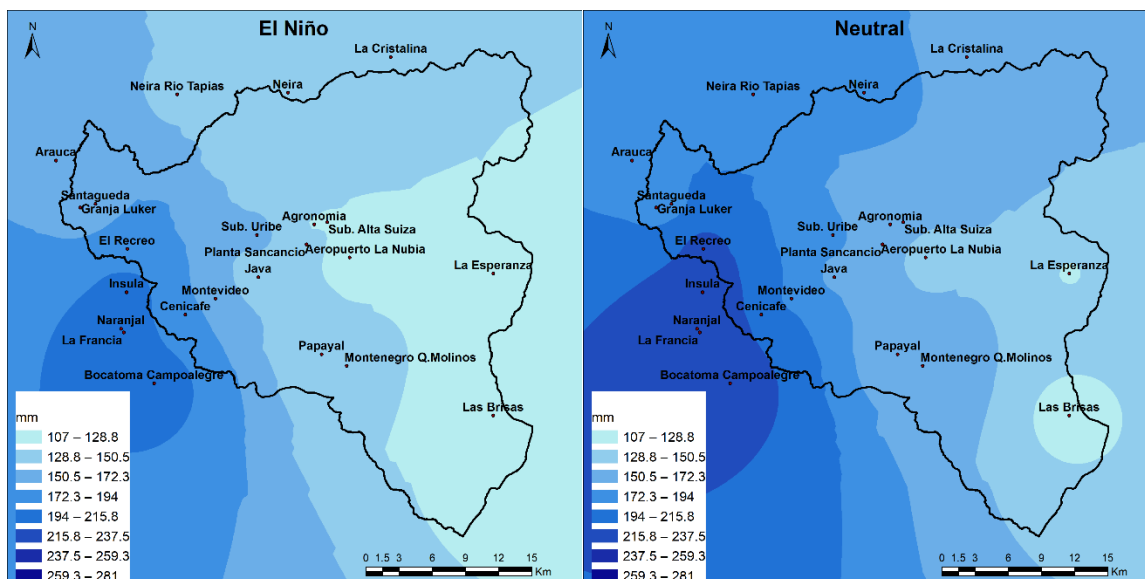
En la **Figura 4-53** se muestra el comportamiento mensual multianual de la precipitación respecto a las fases El Niño, La Niña y Neutral del ENSO, comprendido entre el periodo 1981-2010 para la estación Granja Luker. Este análisis se realizó para todas las estaciones dentro de la investigación y todas presentan el mismo comportamiento. Se logra ver la bimodalidad de las lluvias con sus picos en abril-mayo y octubre-noviembre, adicionalmente, se puede ver que los aumentos en precipitación son mayores a los normales, en especial en los periodos secos de poca lluvia como junio, julio, y agosto.

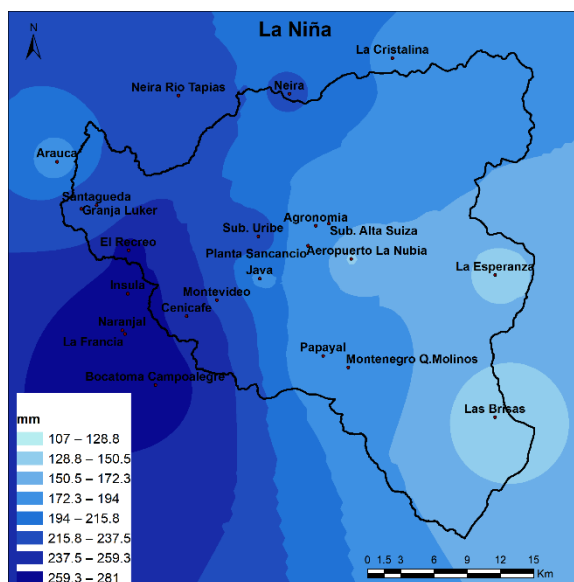
Figura 4-53: Efectos del ENSO en la precipitación, estación Granja Luker (1981 - 2010).



A través de la espacialización de la precipitación separada por condición hidrológica se puede observar la relación directa existente entre la precipitación y cada fase del ENSO. En la fase La Niña las lluvias aumentan en promedio un 16%, mientras que en la fase El Niño disminuyen un 15%, estos cambios se generan de manera uniforme y constante sobre el territorio, sin que se presenten zona de mayor impacto. En la **Figura 4-54** se muestra la secuencia de mapas por condición hidrológica y se logra apreciar la variación en la precipitación, en donde se conservan los patrones de lluvia en condiciones normales, siendo la estación con menor precipitación Las Brisas a los 4150 m.s.n.m, y en general cuando se presenta un evento El Niño, la zona más seca es la cuenca alta, mientras que cuando se presenta un evento La Niña la zona más lluviosa es la parte baja de la cuenca, en el área cercana a la estación el Recreo

Figura 4-54: Precipitación promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).





4.4.2 Relación de la temperatura con el ENSO

A escala mensual, las anomalías promedio en la temperatura para el periodo 1981 – 2010 fueron 3.9% en episodios de la fase El Niño y -2.1% durante La Niña. En años húmedos, las mayores anomalías se dan en febrero con un valor promedio de -4.9%. En años secos, se registran las mayores anomalías en enero con valores promedio de 8.2%. A continuación, en la **Figura 4-55** y en la **Figura 4-56** se presentan las relaciones de la temperatura en las estaciones Naranjal y Centicafé teniendo en cuenta las diferentes fases del ENSO. Las estaciones restantes presentan el mismo comportamiento.

Figura 4-55: Efectos del ENSO en la temperatura media, estación Naranjal (1981 - 2010).

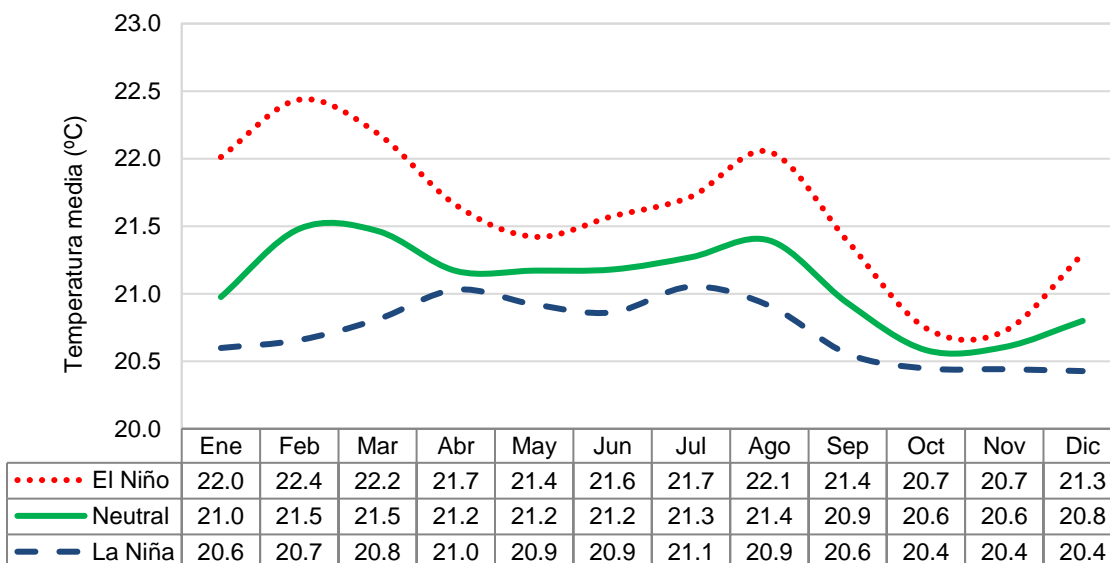
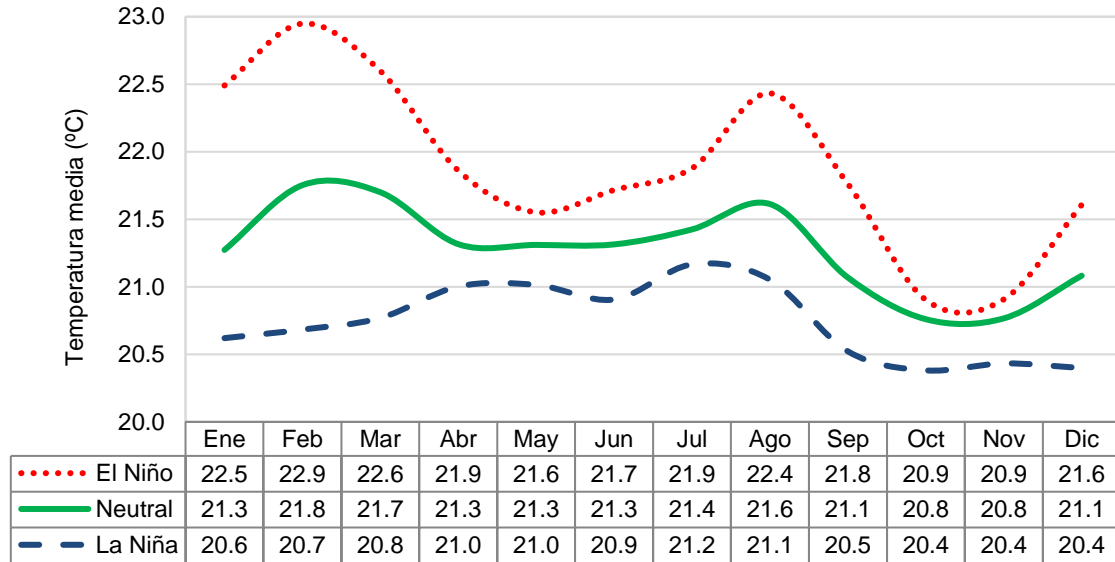
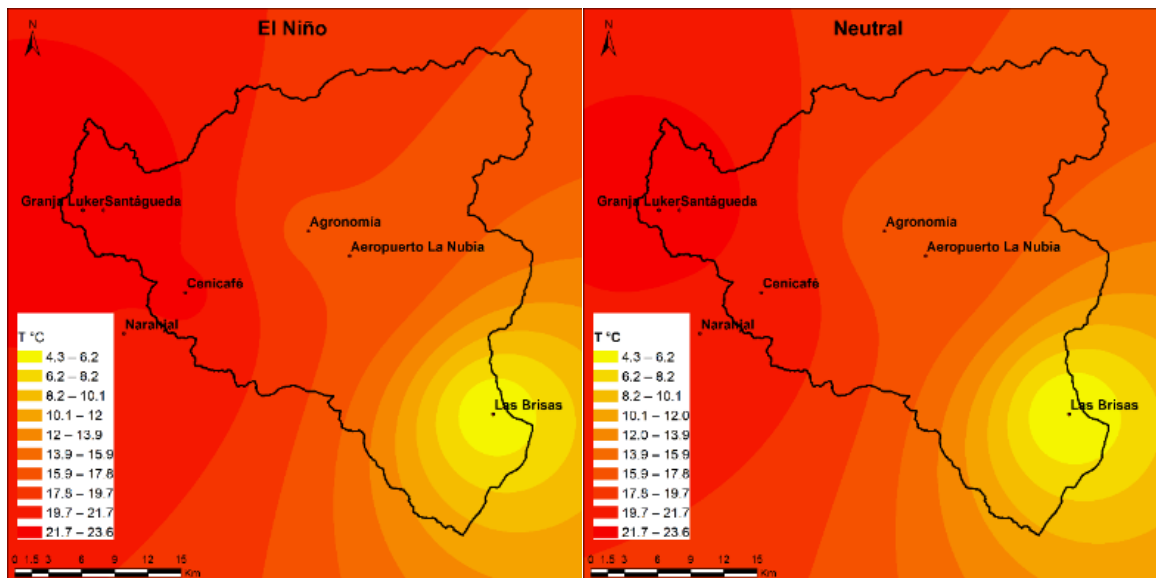


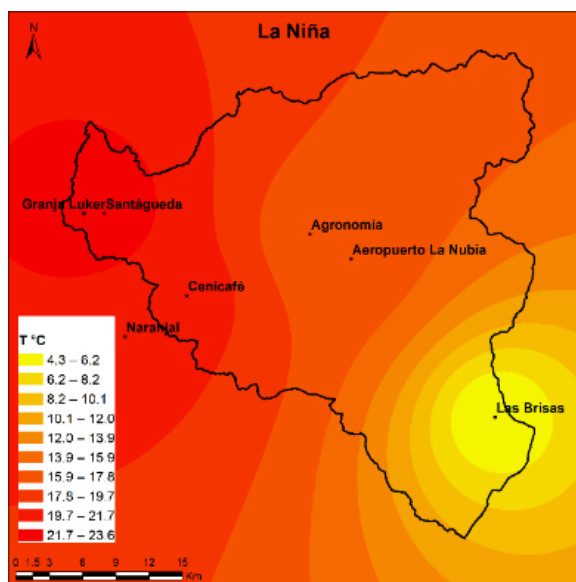
Figura 4-56: Efectos del ENSO en la temperatura media, estación Cenicafé (1981 - 2010).



En la **Figura 4-57** se observa el comportamiento espacial de la temperatura para toda la cuenca durante cada fase del ENSO, es evidente que los años con fase El Niño son más cálidos en comparación con los años neutrales y durante La Niña son más fríos. Se puede observar también como en la cuenca los valores de temperatura presentes durante la condición neutral, se desplazan hacia la cuenca alta al presentarse un episodio El Niño, manifestado el incremento de temperatura sobre el territorio, y en dirección contraria cuando se presenta una fase La Niña, enfriando la cuenca. Estos cambios aportados por el ENSO se generan de manera uniforme y constante sobre el territorio, sin que se presenten zonas con mayor afectación.

Figura 4-57: Temperatura promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).





4.4.3 Relación de la humedad relativa con el ENSO

Los efectos de la variabilidad climática en la humedad relativa a causa del ENSO se ilustran en la **Figura 4-58** y en la **Figura 4-59** para las estaciones Cenicafé y Agronomía, como representación del comportamiento presente en las otras estaciones. Se presentan incrementos durante La Niña y reducciones durante El Niño, estas variaciones respecto a la fase neutra son 1.3% y -2.1% respectivamente. Las mayores anomalías se presentan en el mes de agosto con valores promedio de 4.3% para años húmedos y -5.5% para años secos. Durante los meses de abril y mayo no se presenta una variación significativa entre las fases, como si se presenta en el mes de agosto.

Figura 4-58: Efectos del ENSO en la humedad relativa, estación Cenicafé (1981 - 2010).

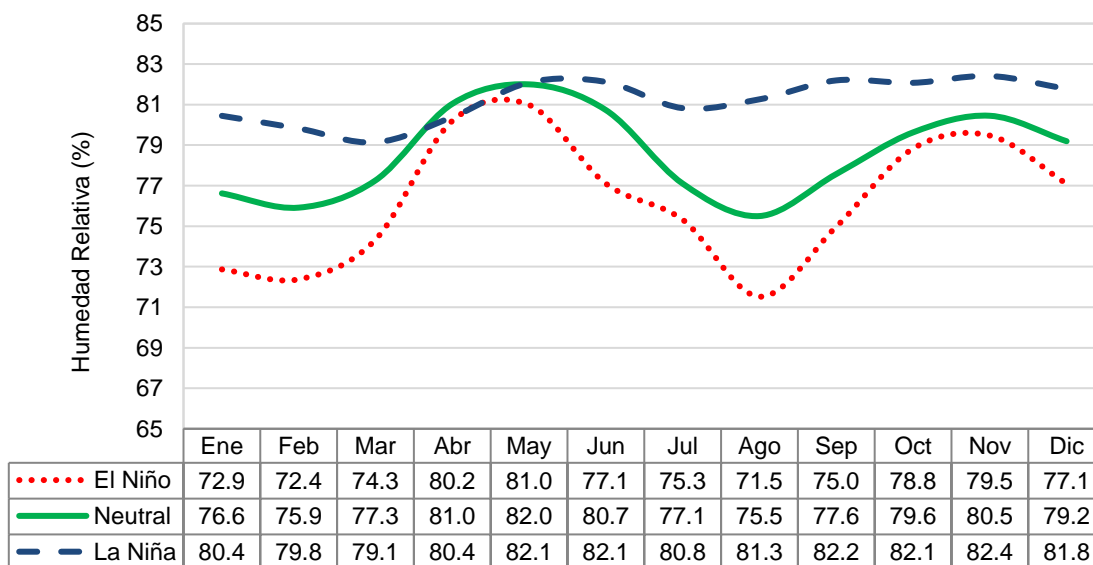
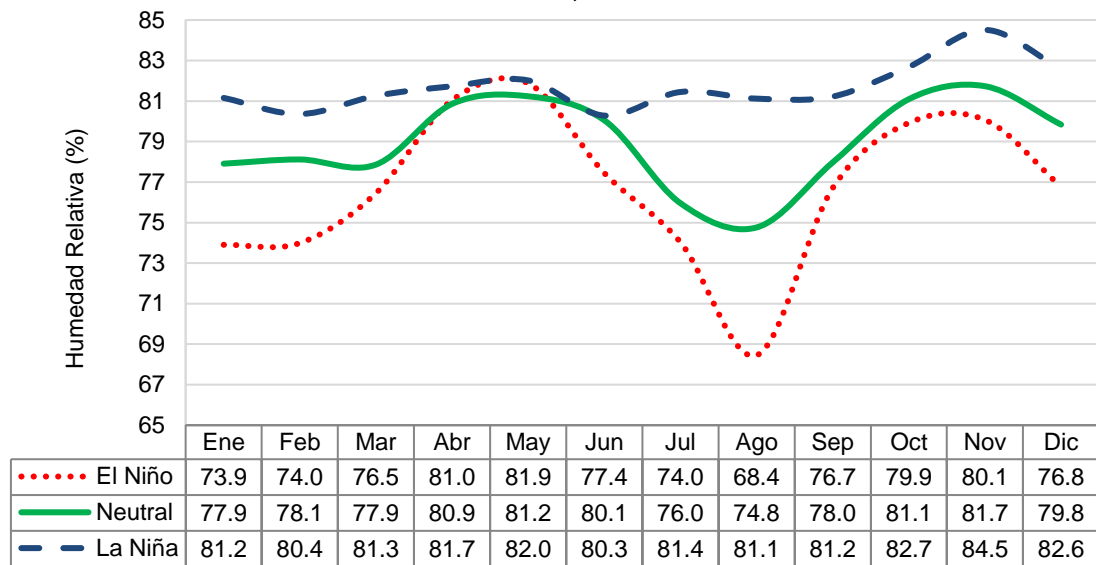
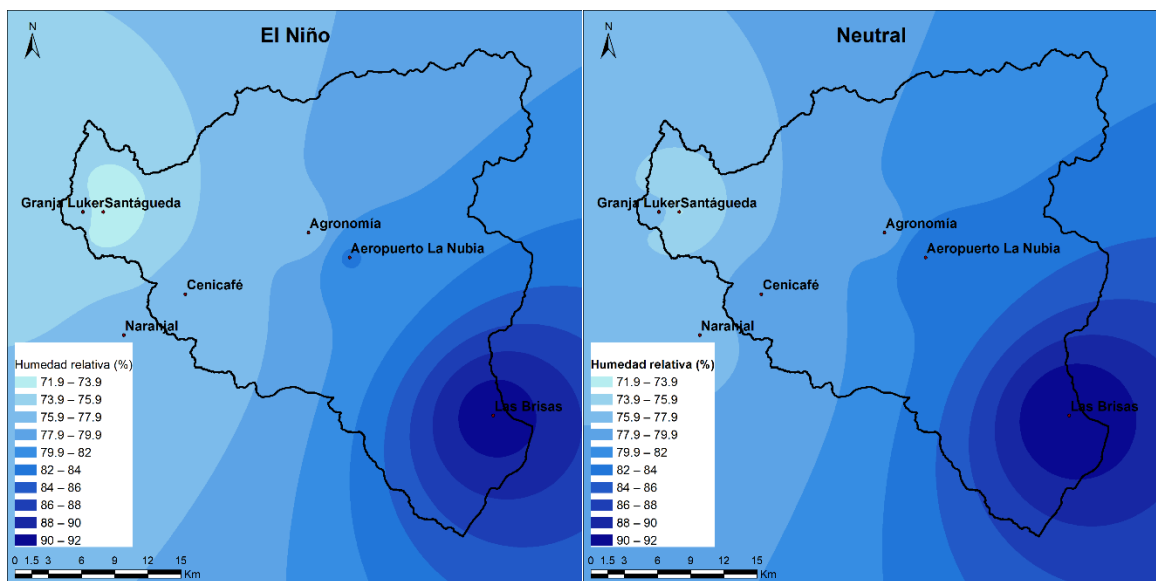


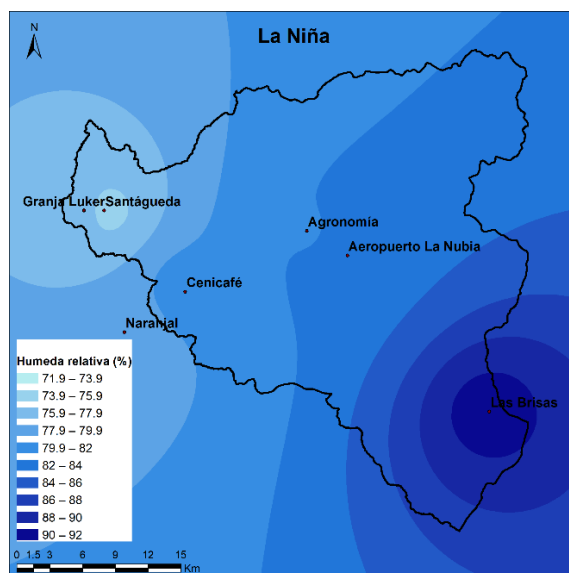
Figura 4-59: Efectos del ENSO en la humedad relativa, estación Agronomía (1981 - 2010).



En la **Figura 4-60** se muestra la variación espacial de la humedad relativa durante cada una de las fases del ENSO para la cuenca, observándose que los cambios durante cada una de estas fases se presentan de una manera uniforme en toda la cuenca. No obstante, la alteración de esta variable con respecto a cada fase del ENSO no es tan marcada y se sigue conservando el patrón de las condiciones normales, siendo más húmeda la parte alta de la cuenca en donde se encuentra el páramo, y menos húmedo la cuenca baja por el sector de Santágueda.

Figura 4-60: Humedad relativa promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).





4.4.4 Relación del brillo solar con el ENSO

Los efectos del ENSO en la cuenca del río Chinchiná relacionados con el brillo solar se presentan en la **Figura 4-61** y en la **Figura 4-62** para las estaciones Granja Luker y Santágueda. En los años neutrales se tiene un promedio mensual de 130.5 horas de brillo solar, en años húmedos 119.7 horas y en años secos 138.8 horas. Los promedios de brillo solar diarios son 4.3 horas en años neutrales, 4 horas en años húmedos y 4.6 horas en años secos. En general se produce un aumento en el brillo solar durante la fase El Niño para todos los meses a excepción de abril-mayo donde el aumento se produce en la fase La Niña. Es de destacar el mes de abril, donde la fase El Niño presenta los valores más bajos de brillo solar, incluso más que las otras fases, en septiembre ocurre lo mismo para La Niña. Estos mismos patrones se observaron en las otras estaciones de la investigación.

Figura 4-61: Efectos del ENSO en el brillo solar, estación Granja Luker (1981 - 2010).

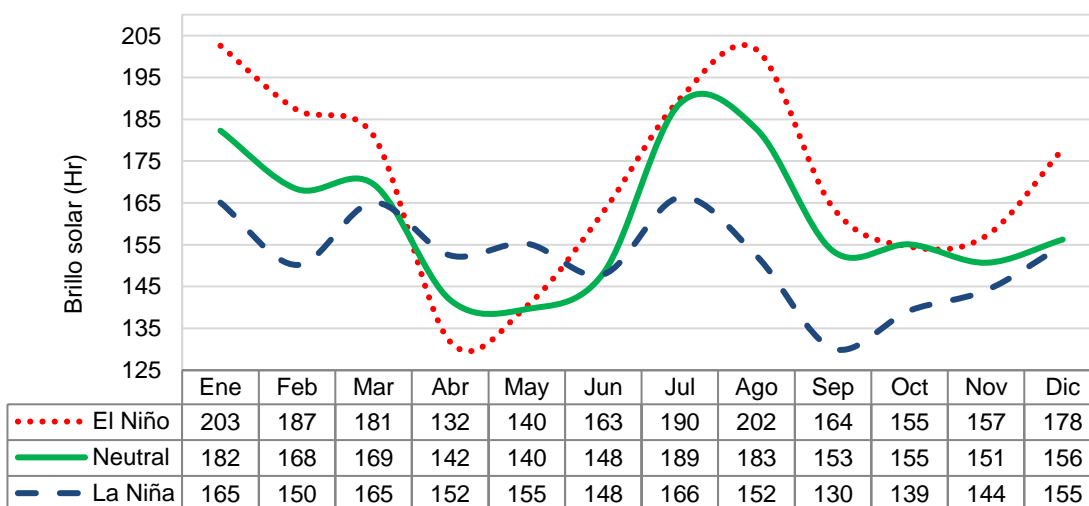
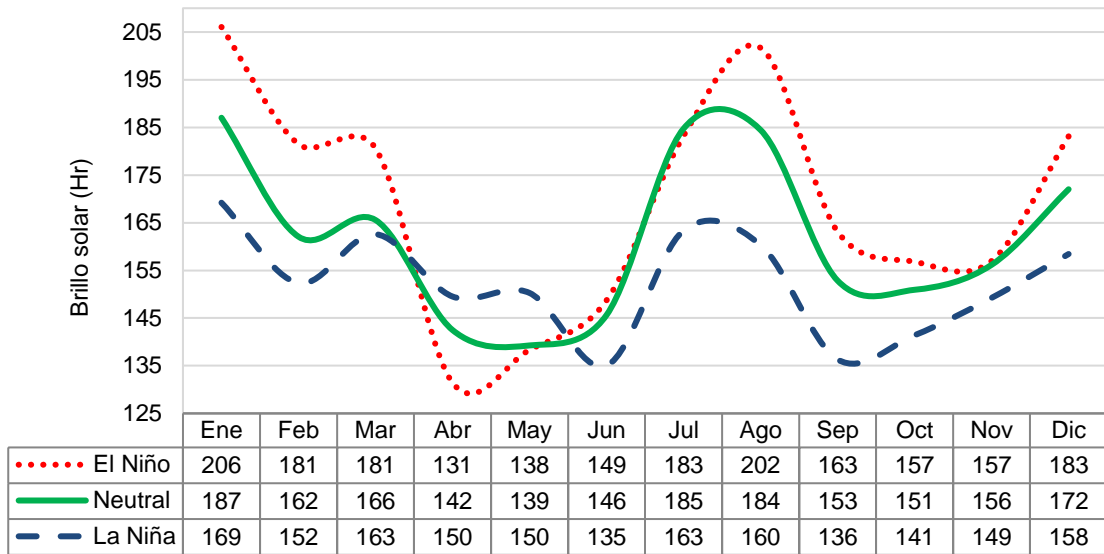
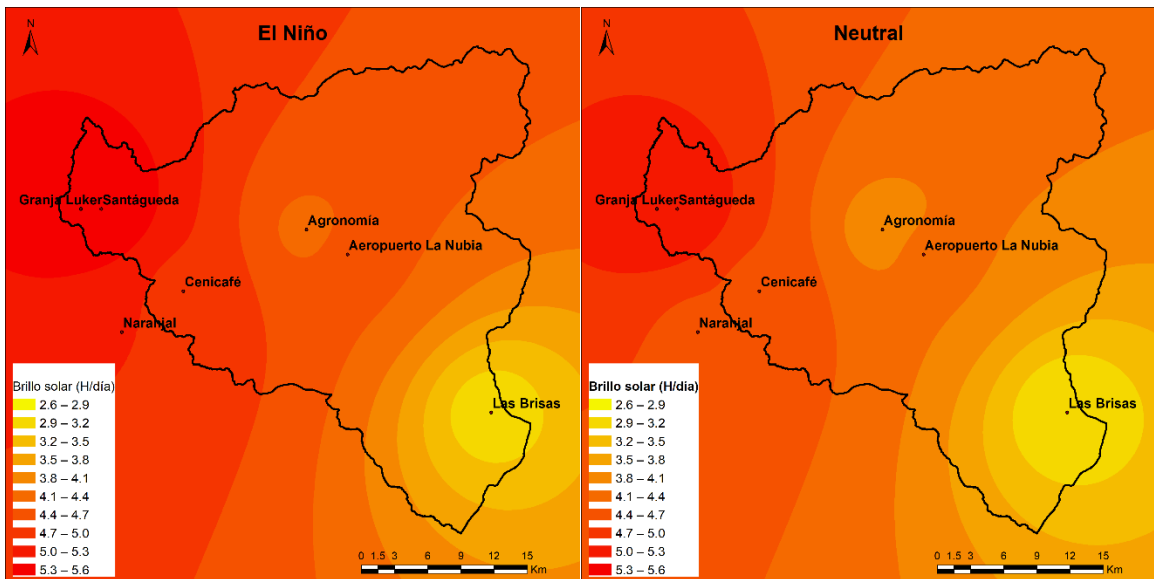


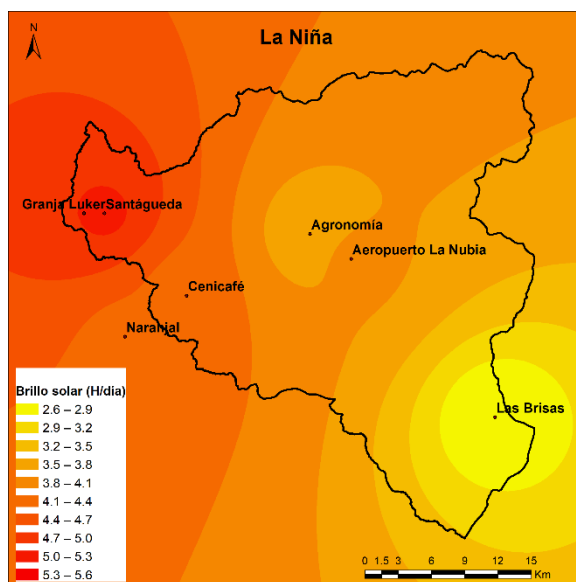
Figura 4-62: Efectos del ENSO en el brillo solar, estación Santágueda (1981 - 2010).



En la **Figura 4-63** se presenta la distribución del brillo solar diario en la cuenca del río Chinchiná, se aprecia un desplazamiento durante la fase El Niño hacia la parte alta de la cuenca aumentando las horas de brillo solar al día, y durante la fase La Niña, el desplazamiento se da hacia la parte baja, disminuyendo la cantidad de brillo solar diario.

Figura 4-63: Brillo solar promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).





4.4.5 Relación del tiempo térmico con el ENSO

Las anomalías promedio mensuales en el tiempo térmico para el periodo 1981 – 2010 fueron 4% en episodios de la fase El Niño y -2.1% durante La Niña. En años húmedos, las mayores anomalías se dan en marzo con un valor promedio de -4.8%. En años secos, se registran las mayores anomalías en enero con valores promedio de 8.8%. A continuación, en la **Figura 4-64** y en la **Figura 4-65** se presentan las relaciones de la temperatura en las estaciones Granja Luker y Naranjal teniendo en cuenta las diferentes fases del ENSO, representando el comportamiento general de todas las estaciones. Se aprecia como en el mes húmedo de octubre no hay una diferencia significativa entre las fases.

Figura 4-64: Efectos del ENSO en el tiempo térmico, estación Granja Luker (1981 - 2010).

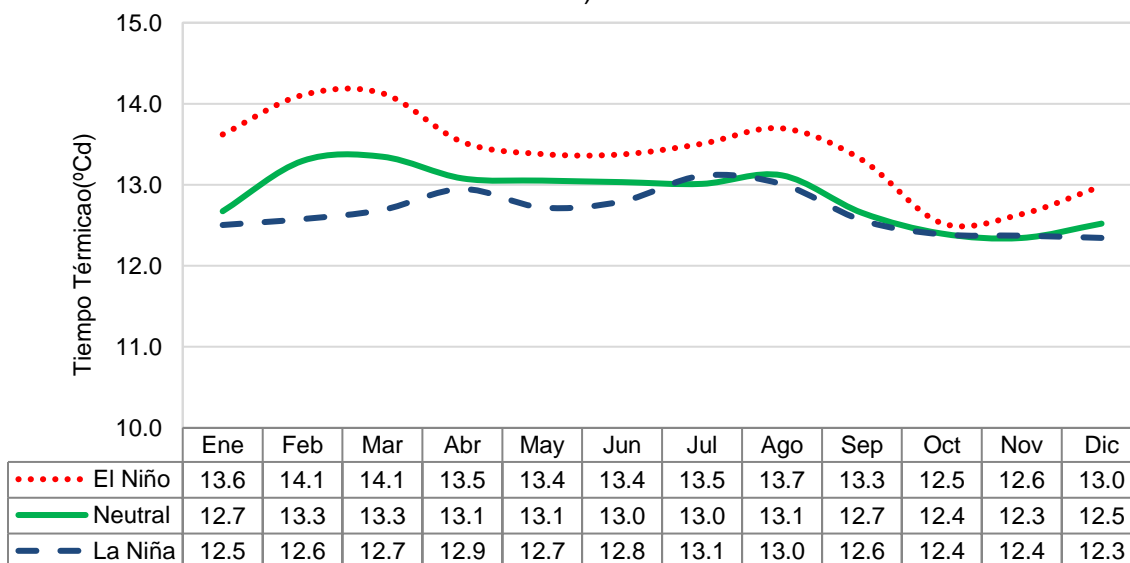
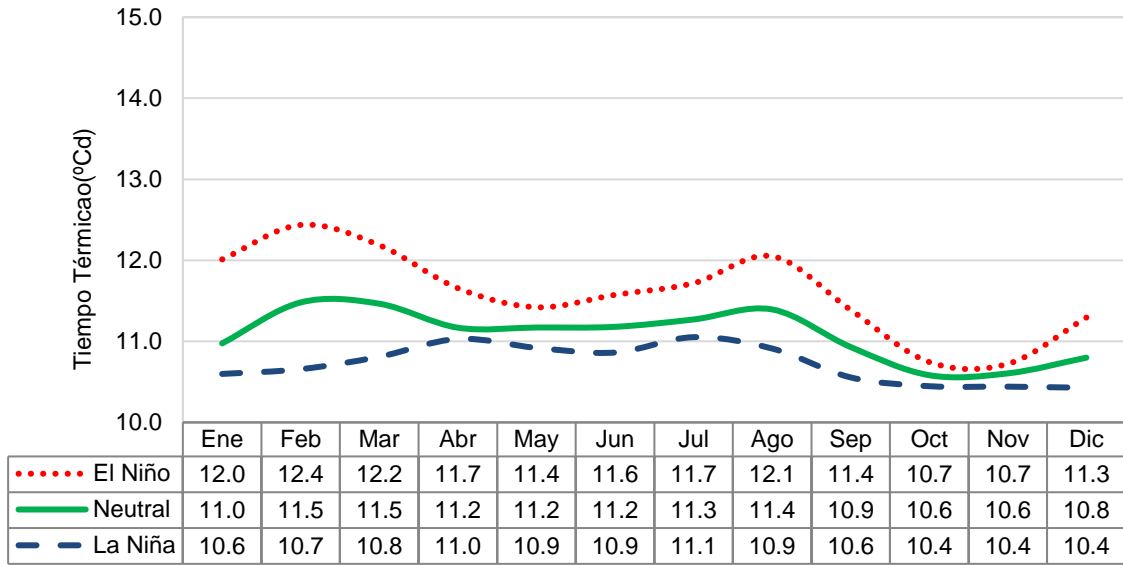
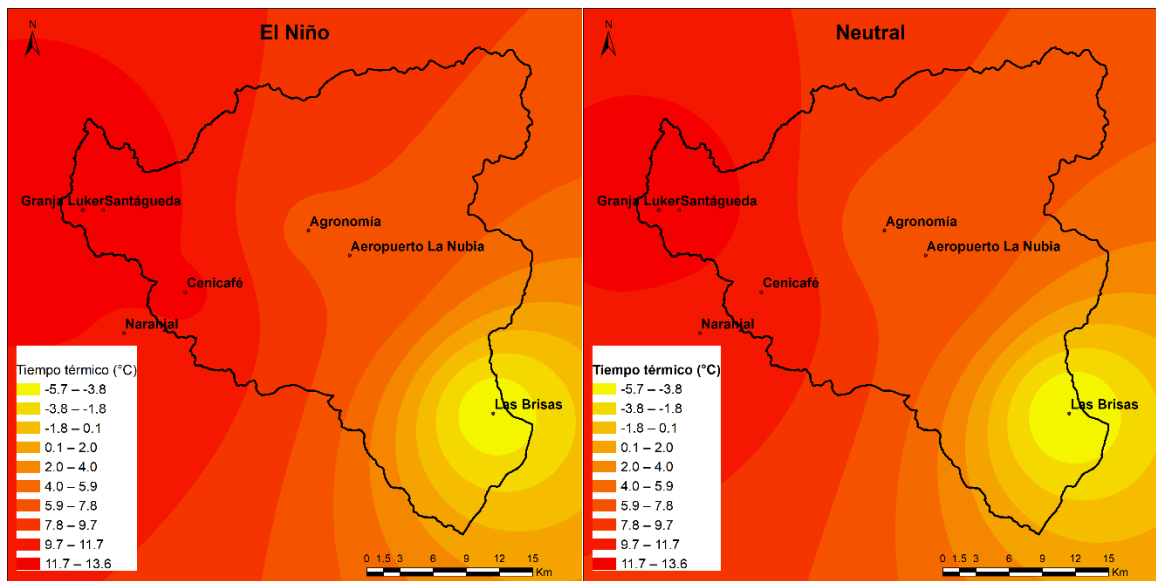


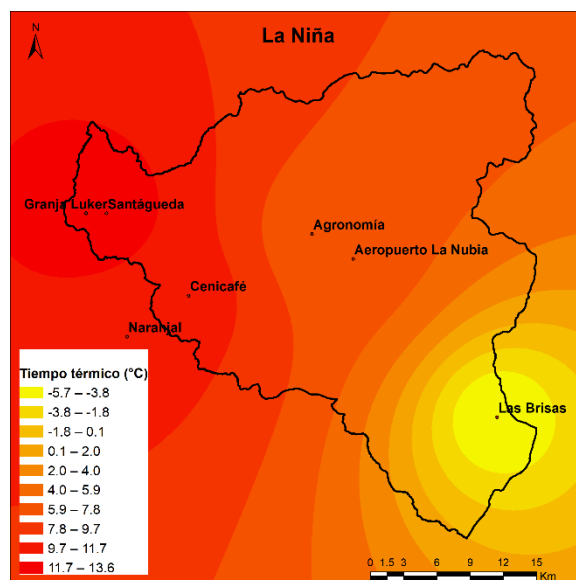
Figura 4-65: Efectos del ENSO en el tiempo térmico, estación Naranjal (1981 - 2010).



En la **Figura 4-66** se ilustra el comportamiento promedio del tiempo térmico diario en cada fase del ENSO para toda la cuenca. Se conservan los patrones presentes en la temperatura, siendo el TT menor en la cuenca alta y mayor en la cuenca baja, con una diferencia de aproximadamente 19°C entre las dos zonas.

Figura 4-66: Tiempo térmico promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).





4.4.6 Relación de la amplitud térmica con el ENSO

Para los años neutros el promedio de amplitud térmica diario fue de 8.3°C en Agronomía y 8.8°C La Nubia, 10.7°C en Cenicafé, 11.3°C en Granja Luker, 7.1°C en Las Brisas, 9.9°C en Naranjal y 11.5°C en Santágueda. En la **Figura 4-67** y en la **Figura 4-68** se puede observar que en la fase El Niño aumenta la amplitud térmica, estos incrementos en relación con los periodos neutros son en promedio 0.5°C en Agronomía, La Nubia y Granja Luker, 0.4°C en Cenicafé y en Naranjal, 0.7°C en Santágueda y 0.2°C en Las Brisas. Los mayores incrementos se dan en los meses de enero y agosto.

Por otro lado, se presentan disminuciones durante la fase fría del ENSO La Niña. Estas reducciones son en promedio -0.3°C en Naranjal, -0.4°C en Cenicafé y Santágueda, -0.5°C en Agronomía y Granja Luker y -0.2°C en Las Brisas. Las mayores reducciones se presentan en agosto: Agronomía -1.1°C, Cenicafé -0.8°C, Granja Luker -1.4°C, Las Brisas 0°C, Naranjal -1.1°C y Santágueda -1.4°C.

Figura 4-67: Efectos del ENSO en la amplitud térmica, estación Granja Luker (1981 - 2010).

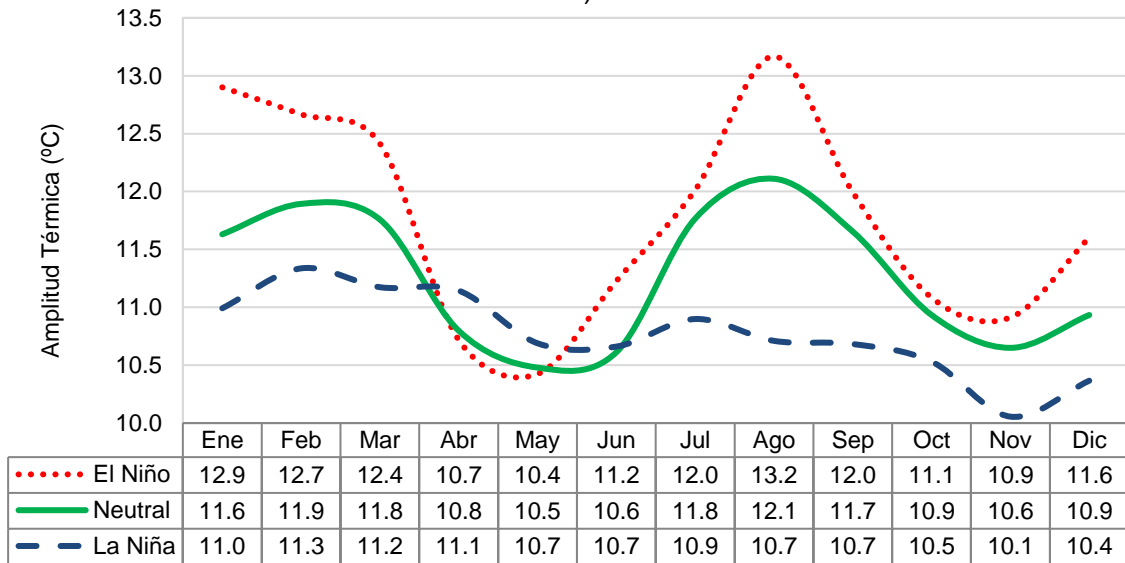
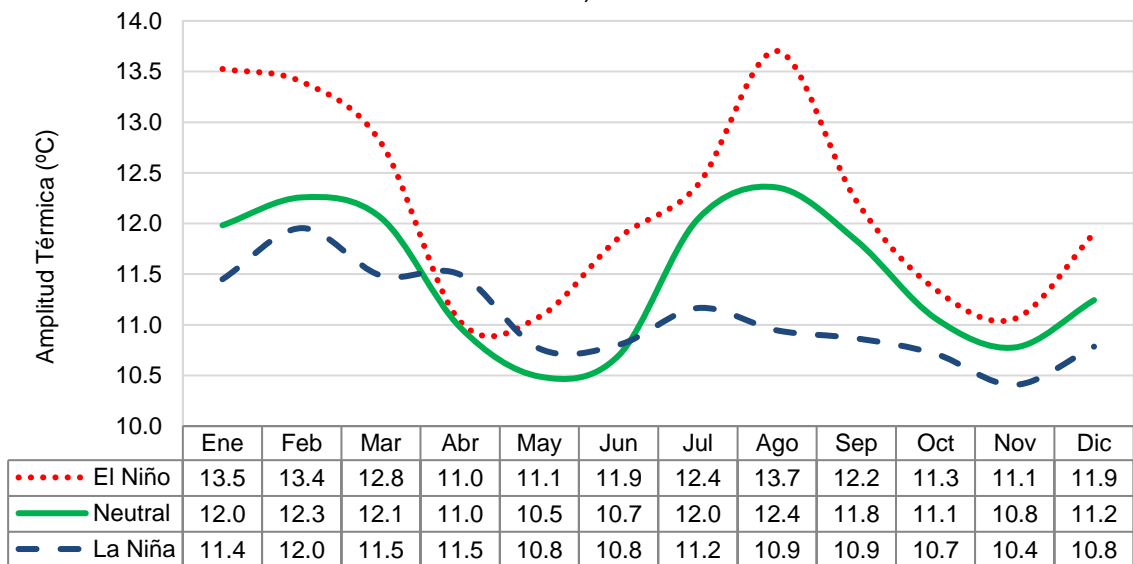
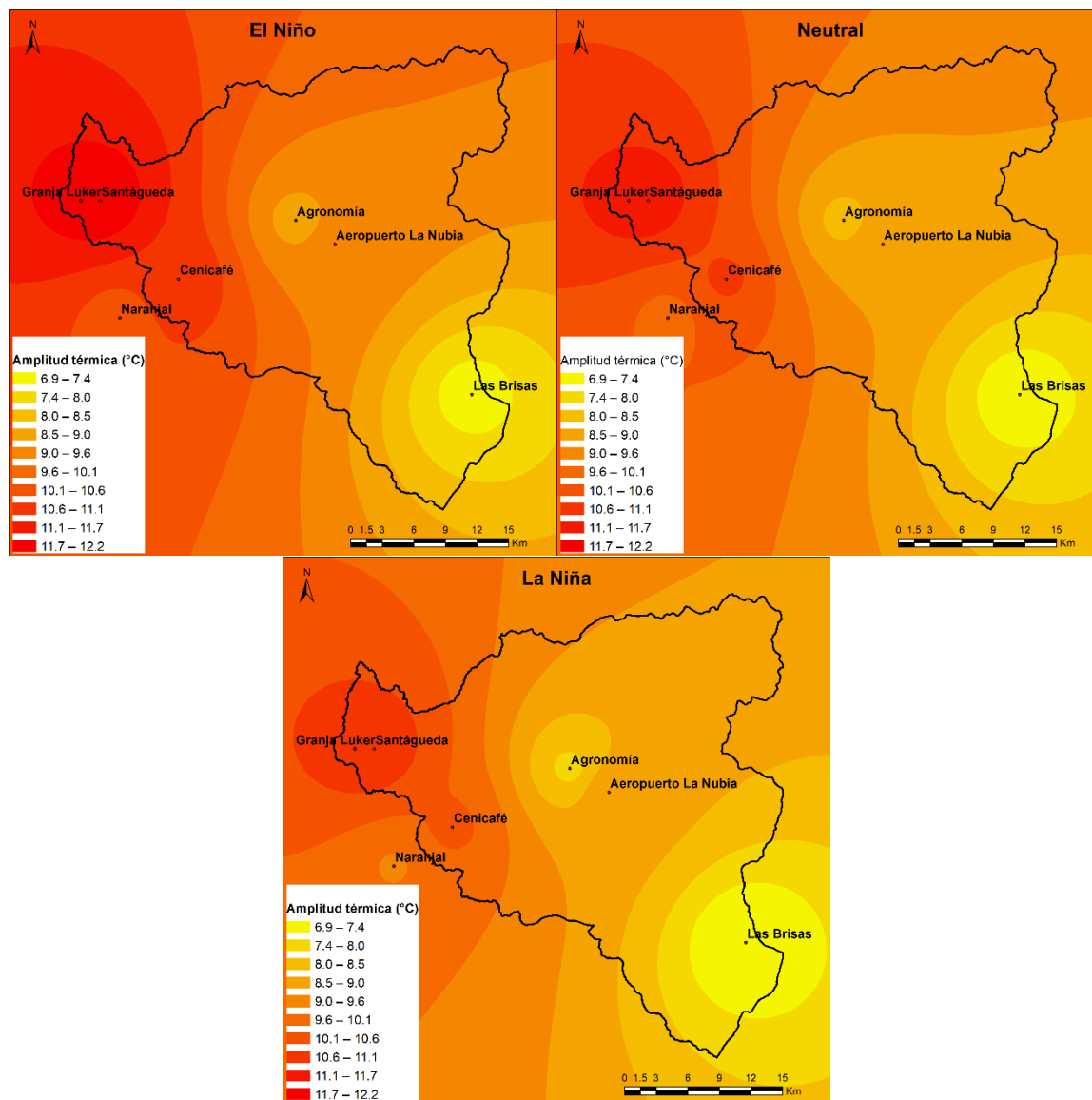


Figura 4-68: Efectos del ENSO en la amplitud térmica, estación Santágueda (1981 - 2010).



En la **Figura 4-69** se presenta la distribución espacial de la amplitud térmica para la cuenca, se observa cómo durante la fase La Niña disminuye, indicando que la temperatura máxima y la mínima no se alejan tanto en comparación con la fase neutra, mientras en la fase El Niño son más amplias estas diferencias creando cambios más drásticos en la región. La cuenca baja posee mayor AT, mientras que en la cuenca alta es menor.

Figura 4-69: Amplitud térmica promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).

4.4.7 Relación del déficit de brillo solar con el ENSO

Los efectos del ENSO en la cuenca del río Chinchiná relacionados con el déficit de brillo solar en las diferentes estaciones se representan en la **Figura 4-70** y en la **Figura 4-71**, para las estaciones Naranjal y Santágueda. En los años neutrales se tiene un promedio acumulado mensual de 213 horas de déficit de brillo solar, en años húmedos 225 horas y en años secos 206 horas. Los promedios de DBS diarios son 7.1 horas en años neutrales, 7.5 horas en años húmedos y 6.9 horas en años secos. Se aprecia como durante los meses húmedos (abril, mayo y octubre) no se presenta mucha variación entre cada fase,

como si se tiene en los meses de febrero y agosto en los cuales generalmente se presentan menos precipitaciones.

Figura 4-70: Efectos del ENSO en el déficit de brillo solar, estación Naranjal (1981 - 2010).

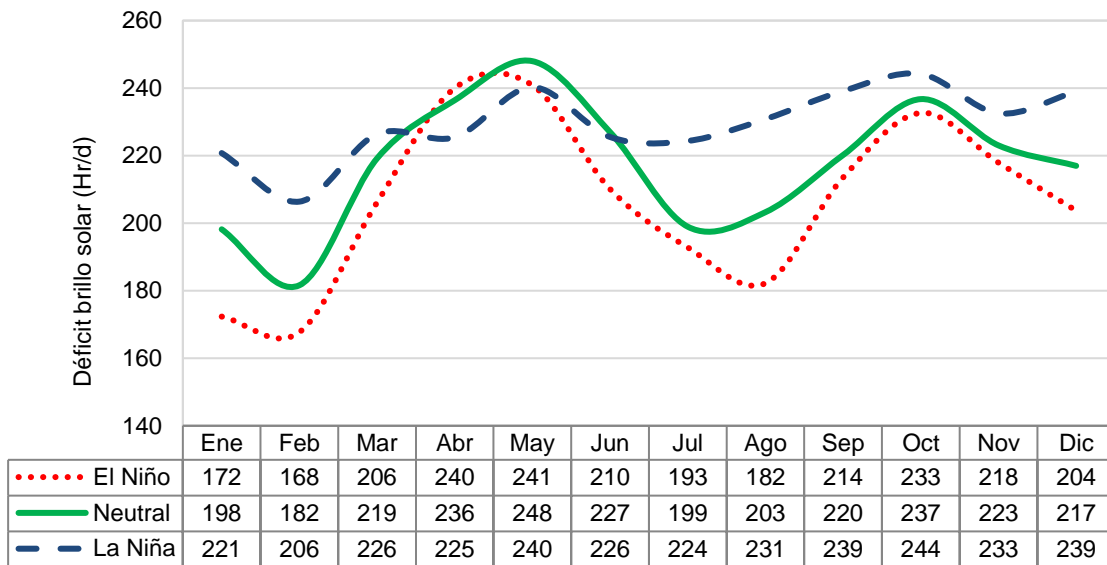
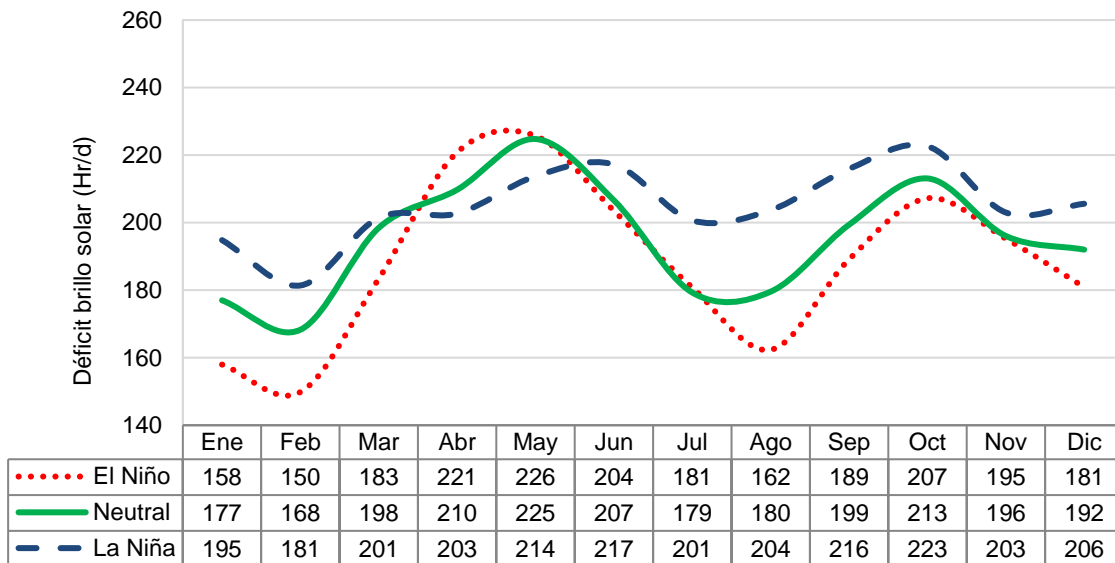


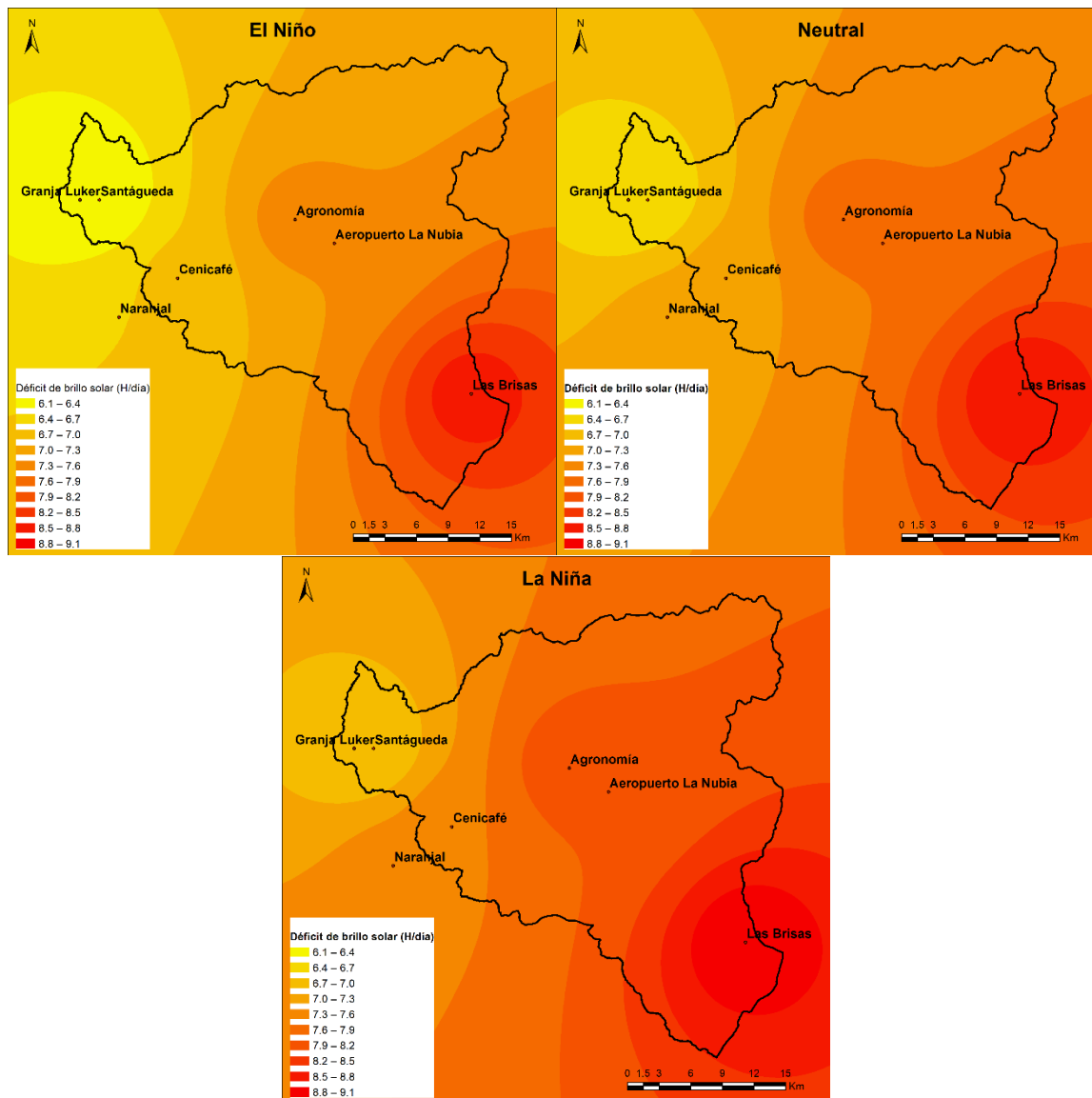
Figura 4-71: Efectos del ENSO en el déficit de brillo solar, estación Santágueda (1981 - 2010).



En la **Figura 4-72** se presenta la variación espacial del DBS durante cada una de las fases del ENSO para la cuenca del río Chinchiná, se aprecia que el mayor déficit se da durante la fase La Niña, tomando los valores mayores, se genera un desplazamiento de los valores hacia la cuenca baja con respecto al comportamiento neutral. En la cuenca baja el déficit

de brillo solar es menor y en la cuenca alta se presenta el mayor, aproximadamente 3 horas de diferencia diarias de DBS existen entre estas dos zonas.

Figura 4-72: Déficit de brillo solar promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).

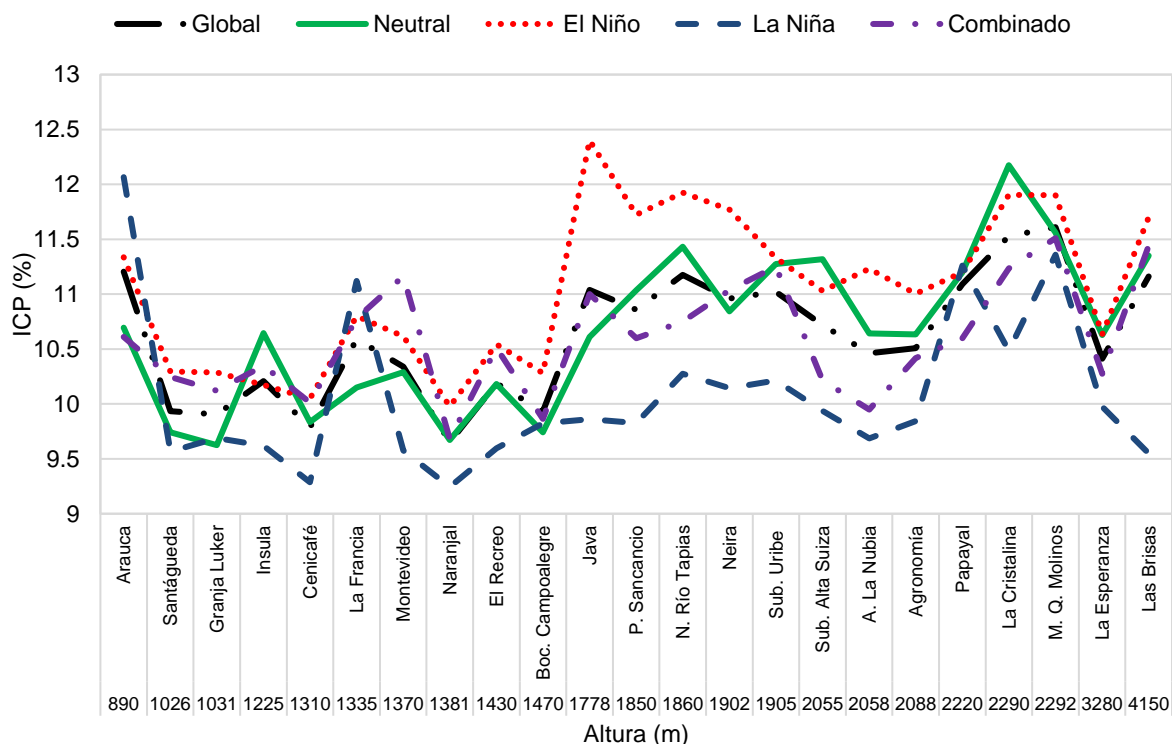


4.4.8 Relación del índice de concentración de la precipitación con el ENSO

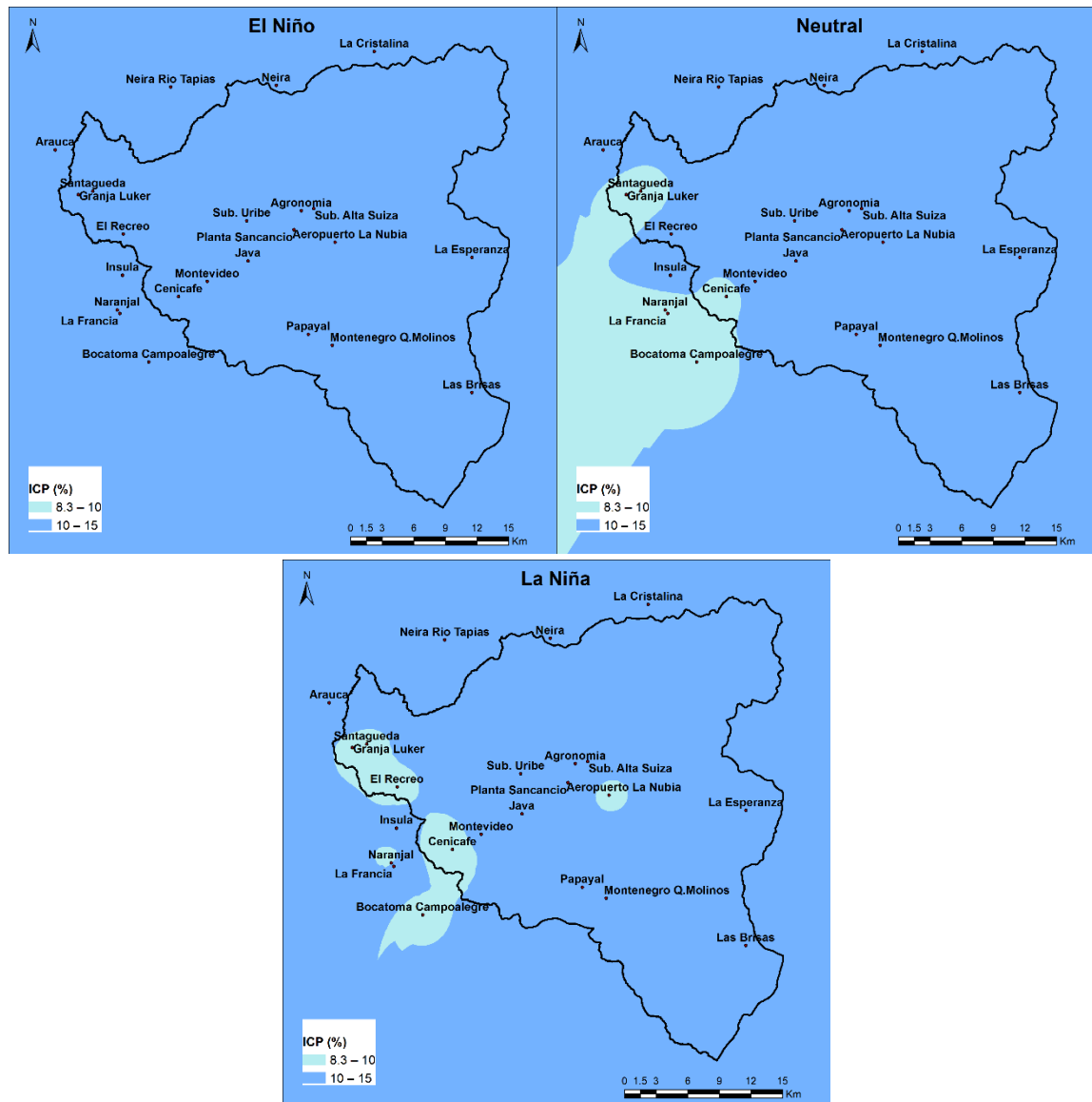
En las estaciones de la investigación, el índice de concentración de la precipitación, si no se tiene en cuenta la variabilidad climática, para el periodo analizado 1981 – 2010, presenta 5 estaciones con una distribución de la precipitación uniforme durante todos los meses del año y 18 con una distribución moderadamente estacional. Al realizar la clasificación en las fases El Niño, La Niña, combinada y normal, esta distribución cambia

reflejando la influencia del ENSO sobre este índice. En la fase El Niño todas las estaciones presentan una distribución moderadamente estacional, en La Niña 14 estaciones se distribuyen uniformemente y 9 moderadamente estacional, en periodos combinados de fases El Niño y La Niña, 3 estaciones tienen distribución uniforme y 20 moderadamente estacionales. Adicionalmente se observa una relación del ICP con la altitud, a medida que la altura aumenta el índice también se incrementa. Esto indica que en las regiones altas de la cuenca la distribución de la precipitación tiende a ser más irregular, mayor concentración de estas en pocos meses. En la **Figura 4-73** se pueden ver los resultados del ICP.

Figura 4-73: Efectos del ENSO en el índice de concentración de la precipitación.



En la **Figura 4-74** se presenta la distribución espacial del índice de concentración de la precipitación promedio en la cuenca del río Chinchiná para cada fase del ENSO. Se observa cómo durante las fases neutral y La Niña la precipitación en la parte sur-occidental de la cuenca es uniforme durante todos los meses del año, mientras que en la fase El Niño, la distribución de la lluvia es moderadamente estacional para todo el territorio. Este comportamiento se debe a que durante la fase La Niña el incremento de la precipitación en los meses menos lluviosos es mayor, ocasionando una uniformidad durante el año, y en la fase El Niño a pesar que se genera una disminución de la ocurrencia de la precipitación en general, se siguen presentando las épocas de lluvia características de la bimodalidad con una disminución en su cantidad.

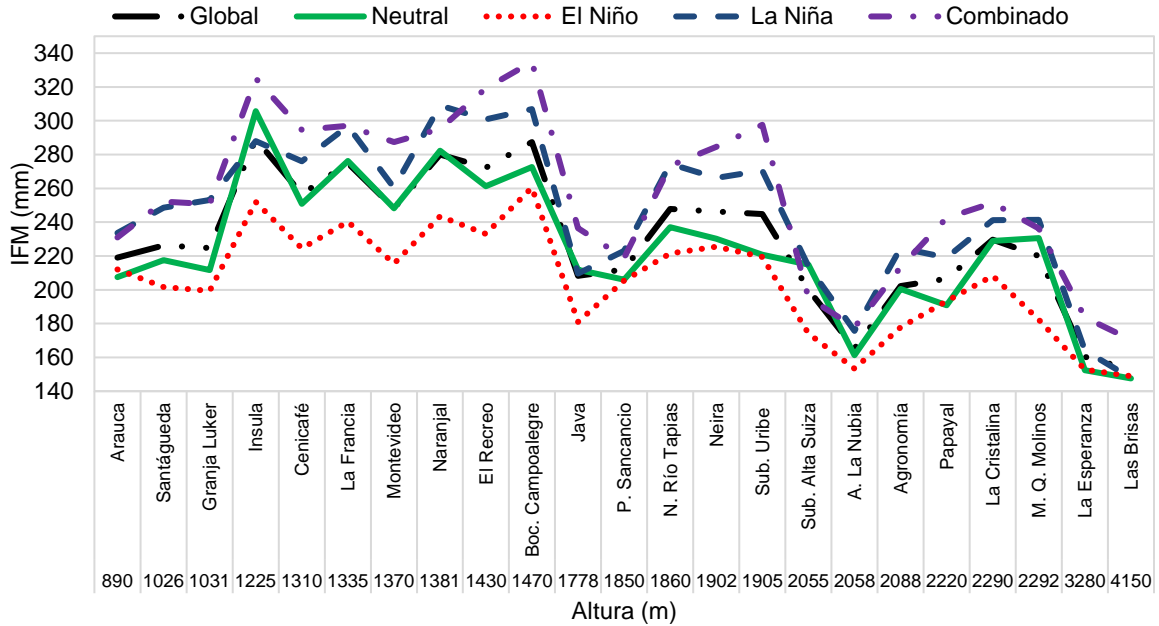
Figura 4-74: ICP promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).

4.4.9 Relación del índice de Fournier modificado con el ENSO

Los valores del índice de Fournier modificado analizados para todas las estaciones, sin tener en cuenta las fases del ENSO, estiman una agresividad de la lluvia muy alta, a excepción de Las Brisas donde es alta, como se muestra en la **Figura 4-75**. Al realizar la clasificación con el ENSO los resultados son: en periodos neutros la estación La Esperanza y Las Brisas estiman la agresividad alta, mientras las otras estaciones siguen en muy alta. Durante la fase El Niño las estaciones La Esperanza, Las Brisas y Aeropuerto La Nubia pasan a una estimación alta. En la fase La Niña (excepto Las Brisas) y combinada todas las estaciones se mantienen en una estimación muy alta de la agresividad, no obstante,

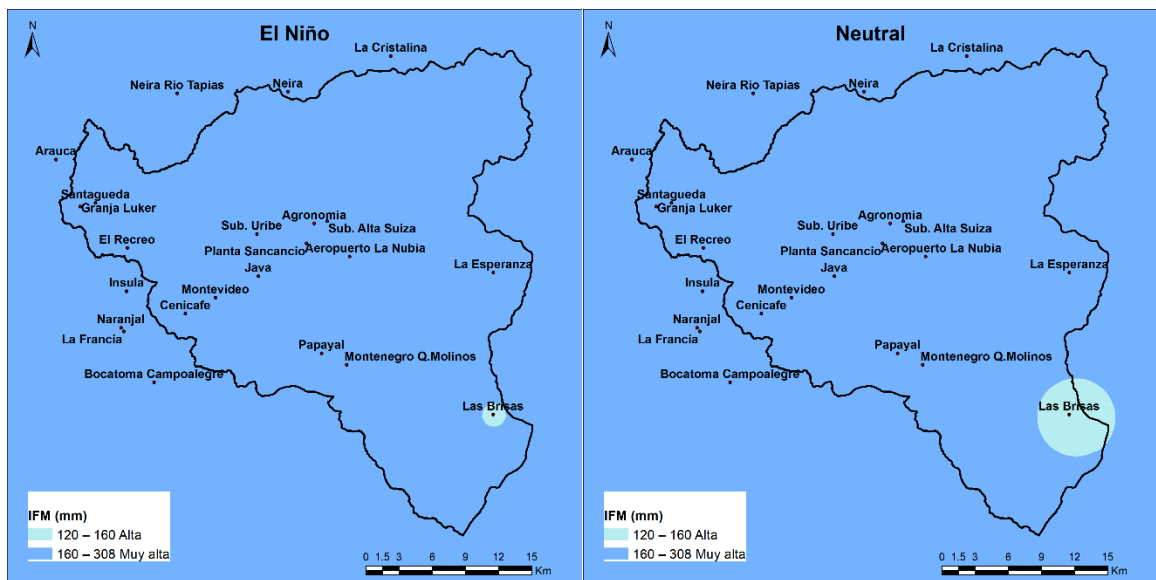
se aprecia que los valores son más altos con respecto al periodo neutro, y mucho más en periodos combinados. Se presenta una disminución en el índice a medida que la altitud aumenta, indicando que en la parte alta de la cuenca la lluvia tiende a ser menos agresiva.

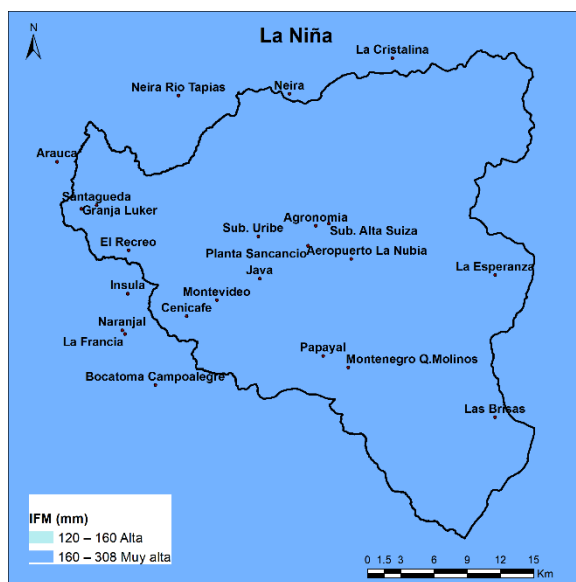
Figura 4-75: Efectos del ENSO en el índice de Fournier modificado.



En la **Figura 4-76** se presenta la distribución del índice de Fournier modificado para cada fase del ENSO en la cuenca. Se aprecia un cambio en la agresividad de la lluvia para la fase La Niña en donde la parte alta, representada por la estación Las Brisas, pasa a clasificarse como muy alta, dejando así toda la cuenca con esa clasificación.

Figura 4-76: IFM promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).

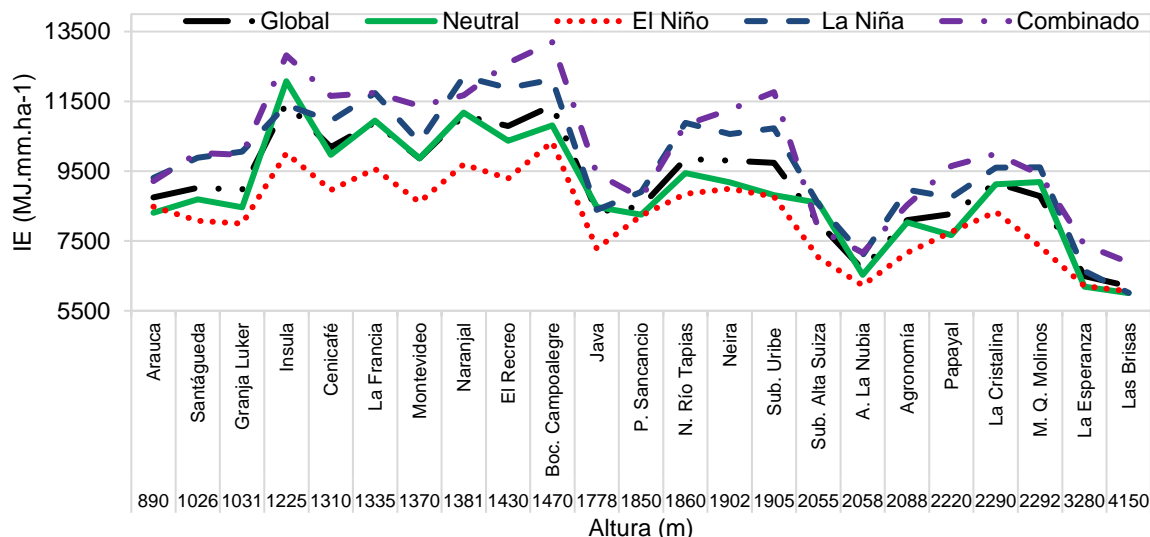




4.4.10 Relación del índice de erosividad con el ENSO

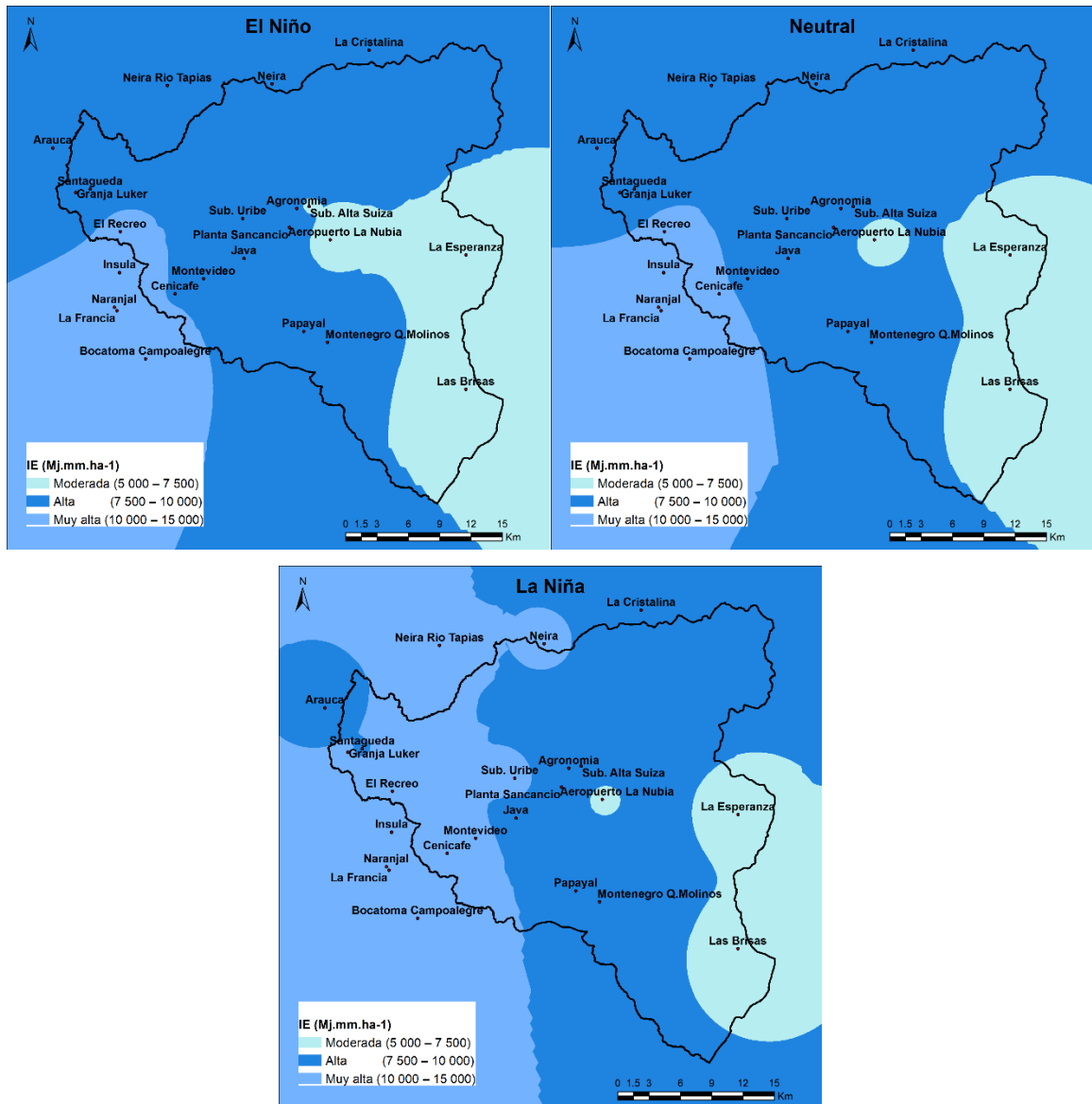
En el índice de erosividad también se manifiestan cambios dependiendo de cada una de las fases del ENSO, tomando valores más bajos durante la fase El Niño. Los valores más altos se presentan en periodos combinados, seguidos de la fase La Niña. En la **Figura 4-77** se ilustran los resultados obtenidos, en donde para la fase neutra 2 estaciones se clasifican con erosividad moderada, 12 alta y 4 muy alta. En la fase El Niño, 4 presentan erosividad moderada, 12 alta y 2 muy alta. Para periodos La Niña y combinados la erosividad en las estaciones es moderada en 2, alta en 6 y muy alta en 10. Igualmente se presenta tendencia con la altitud, a medida que esta aumenta el índice de erosividad disminuye, es decir, en las partes altas de la cuenca la erosividad a causa de la lluvia tiende a ser más baja.

Figura 4-77: Efectos del ENSO en el índice de erosividad.



En la **Figura 4-78** se presenta la distribución espacial del índice de erosividad para la cuenca en cada una de las fases del ENSO. Se aprecia como durante La Niña, la erosión generada a causa de la lluvia se incrementa de alta a muy alta, reflejándose más en la cuenca baja en comparación con la fase neutra.

Figura 4-78: Índice de erosividad promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).



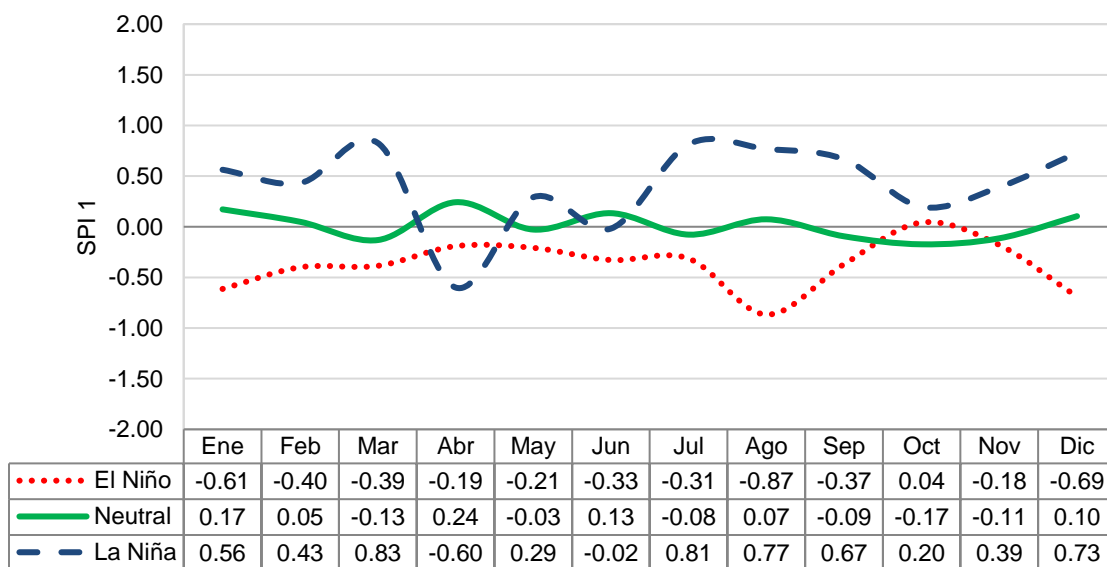
4.4.11 Relación del índice estandarizado de precipitación con el ENSO

En las figuras 4-79, 4-81, 4-83, 4-85 y 4-87, se presentan los resultados obtenidos en la estación Cenicafé para los valores de SPI de 1, 3, 6, 12 y 24 meses asociados a cada una de las fases del ENSO, este mismo comportamiento se observó en todas las estaciones de la investigación. Es de resaltar la relación directa entre los valores del SPI con cada una

de las fases del ENSO al presentar valores negativos que indican sequía durante episodios El Niño y valores positivos que indican humedad durante episodios La Niña. También se aprecia el comportamiento que ocurre en el SPI de un mes, en los meses con incremento de lluvias a causa de la bimodalidad, el índice se acerca a la fase neutra, mientras que en los meses de verano el índice se aleja.

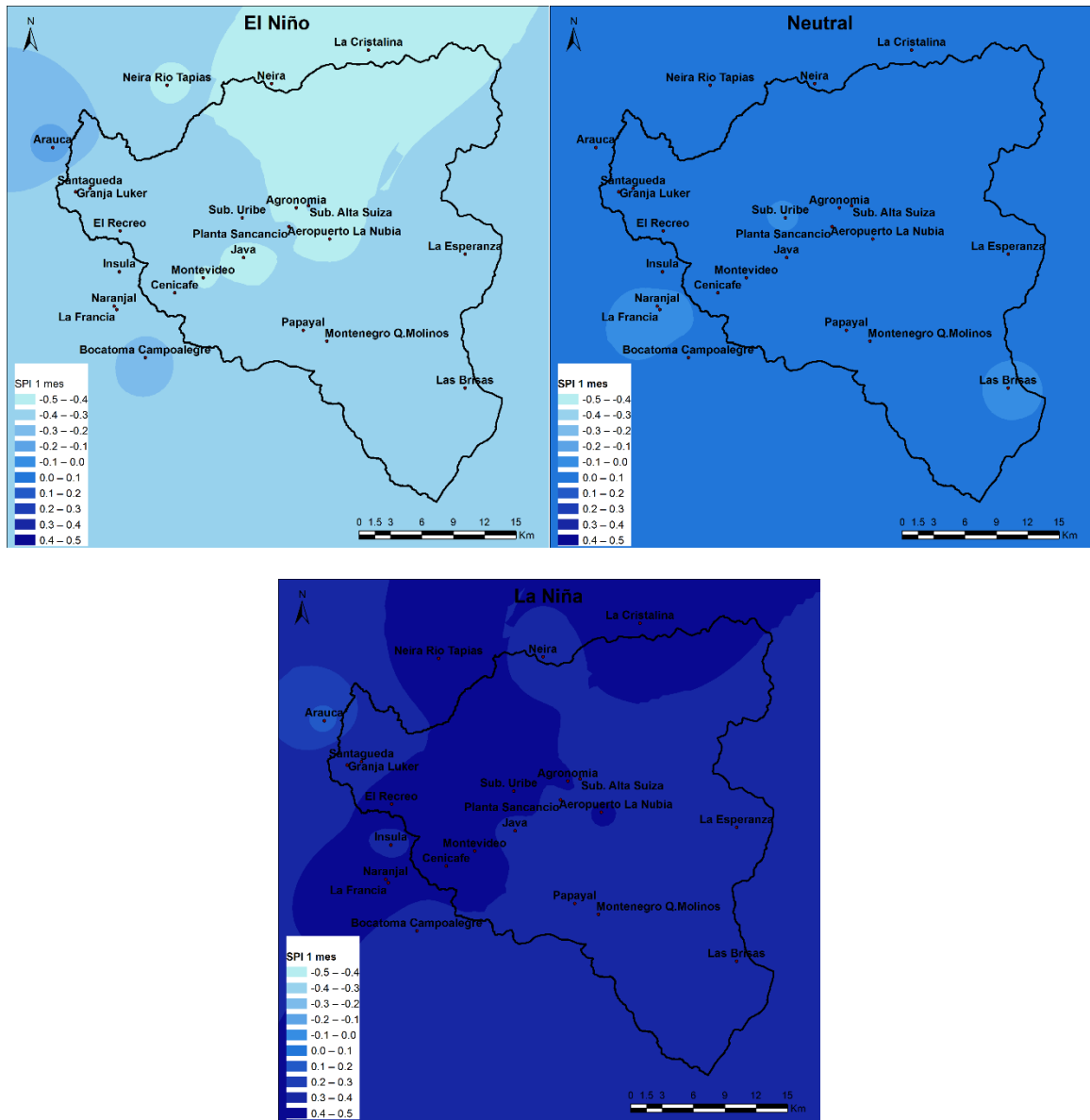
En las figuras **4-80**, **4-82**, **4-84**, **4-86** y **4-88**, se ilustran las variaciones espaciales del SPI en relación a cada fase del ENSO. Los valores promedio del SPI demuestran que durante la fase El Niño, en la cuenca no se producen sequías, el índice se mantiene dentro del rango normal o aproximadamente normal, pero si se destaca que genera una tendencia de disminución en el recurso hídrico al tener valores negativos. Durante la fase La Niña, tampoco se generan extremos de humedad, pero si aumento en ésta ya que sus valores tienden a ser positivos.

Figura 4-79: Efectos del ENSO en el SPI (1 mes), estación Cenicafé (1981 - 2010).



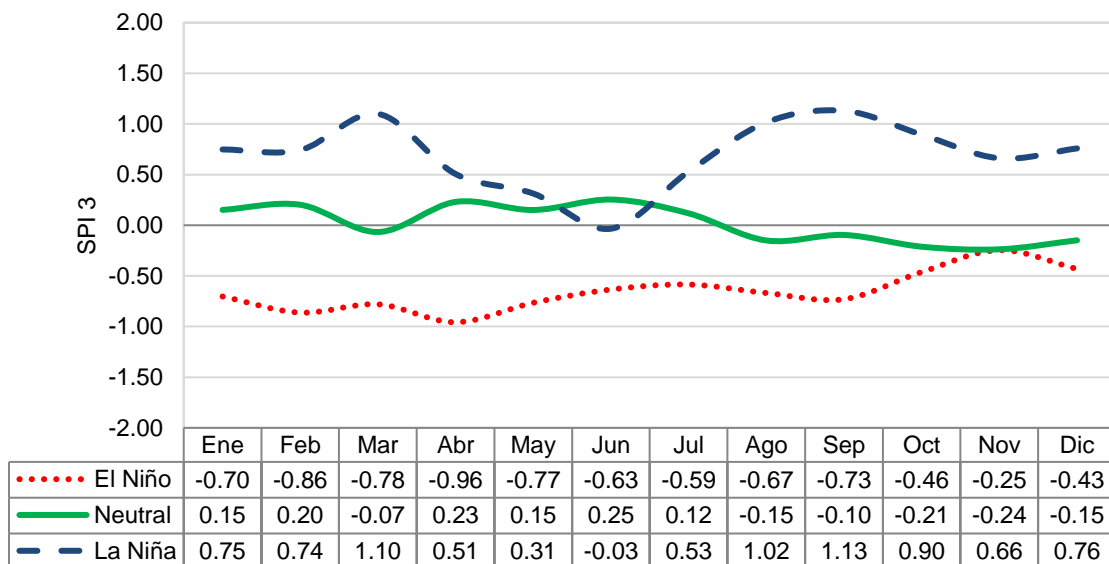
En la **Figura 4-80** se aprecia como la parte norte de la cuenca se ve más influenciada por la ocurrencia de El Niño, mientras que la parte occidental se puede generar mayor exceso de humedad durante la fase La Niña con respecto a la normal, de acuerdo al SPI de 1 mes.

Figura 4-80: SPI 1 mes promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).



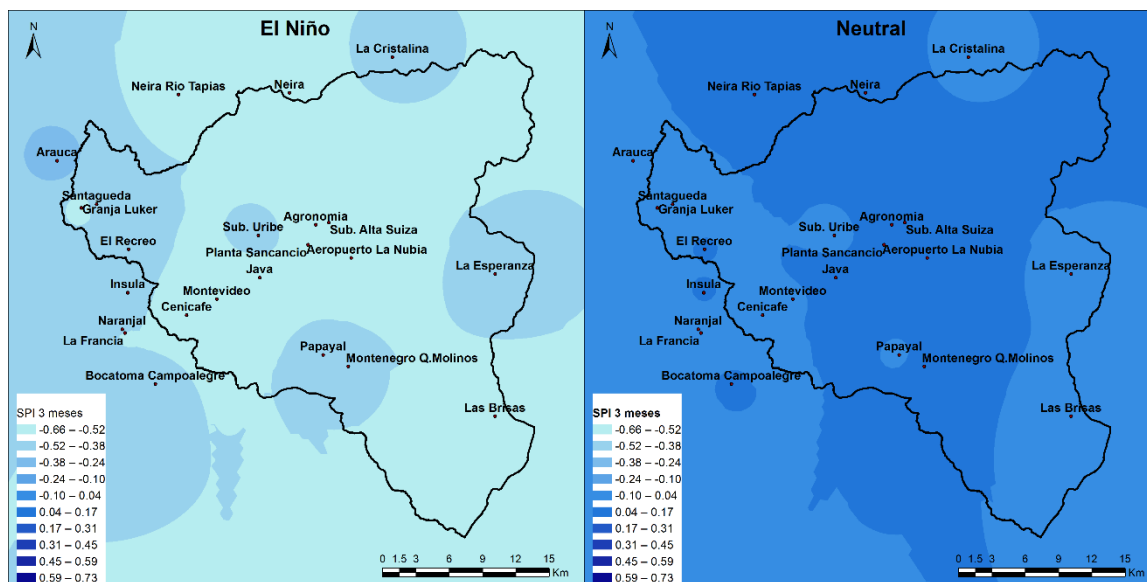
En la **Figura 4-81** se observa como durante la fase El Niño, se mantiene una tendencia de sequía muy larga, por otro lado, la fase La Niña es más variable.

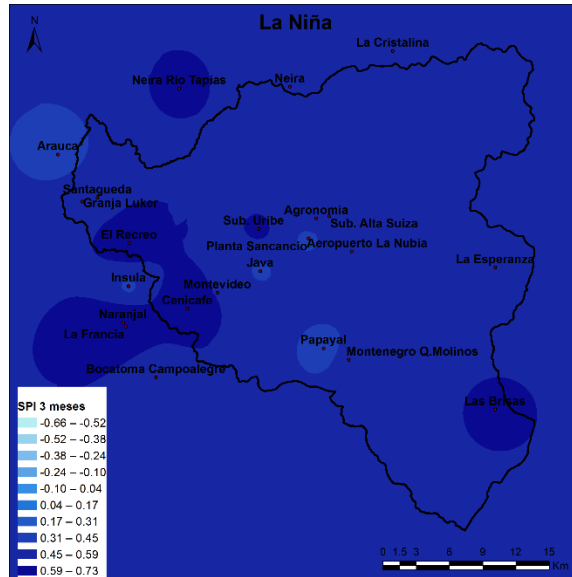
Figura 4-81: Efectos del ENSO en el SPI (3 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).



La distribución espacial en el SPI 3, **Figura 4-82**, es menos uniforme en comparación con el SPI 1, se observan los cambios en cada fase del ENSO, con mayores tendencias de sequía durante El Niño y más precipitaciones durante La Niña.

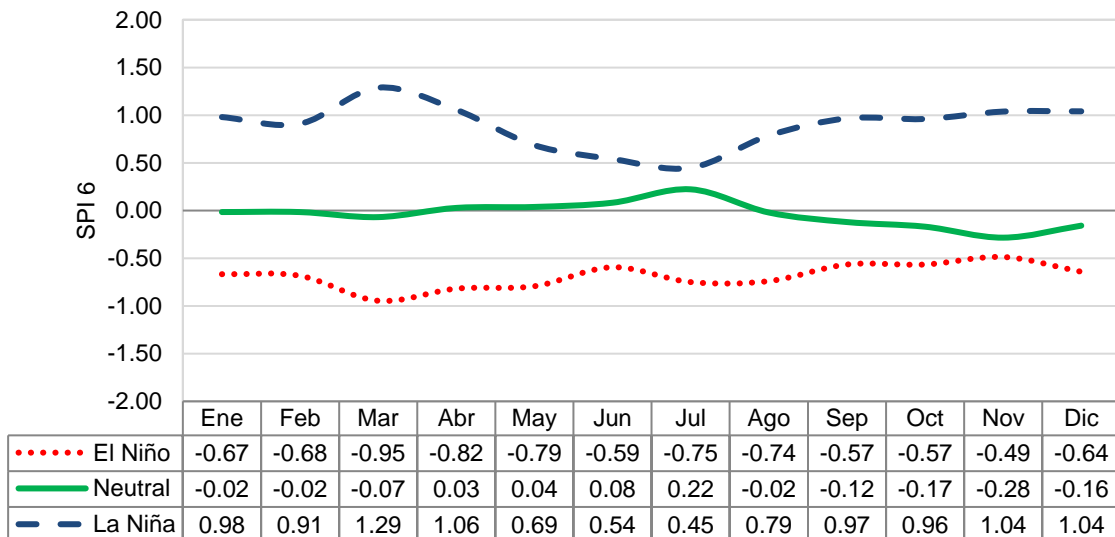
Figura 4-82: SPI 3 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).



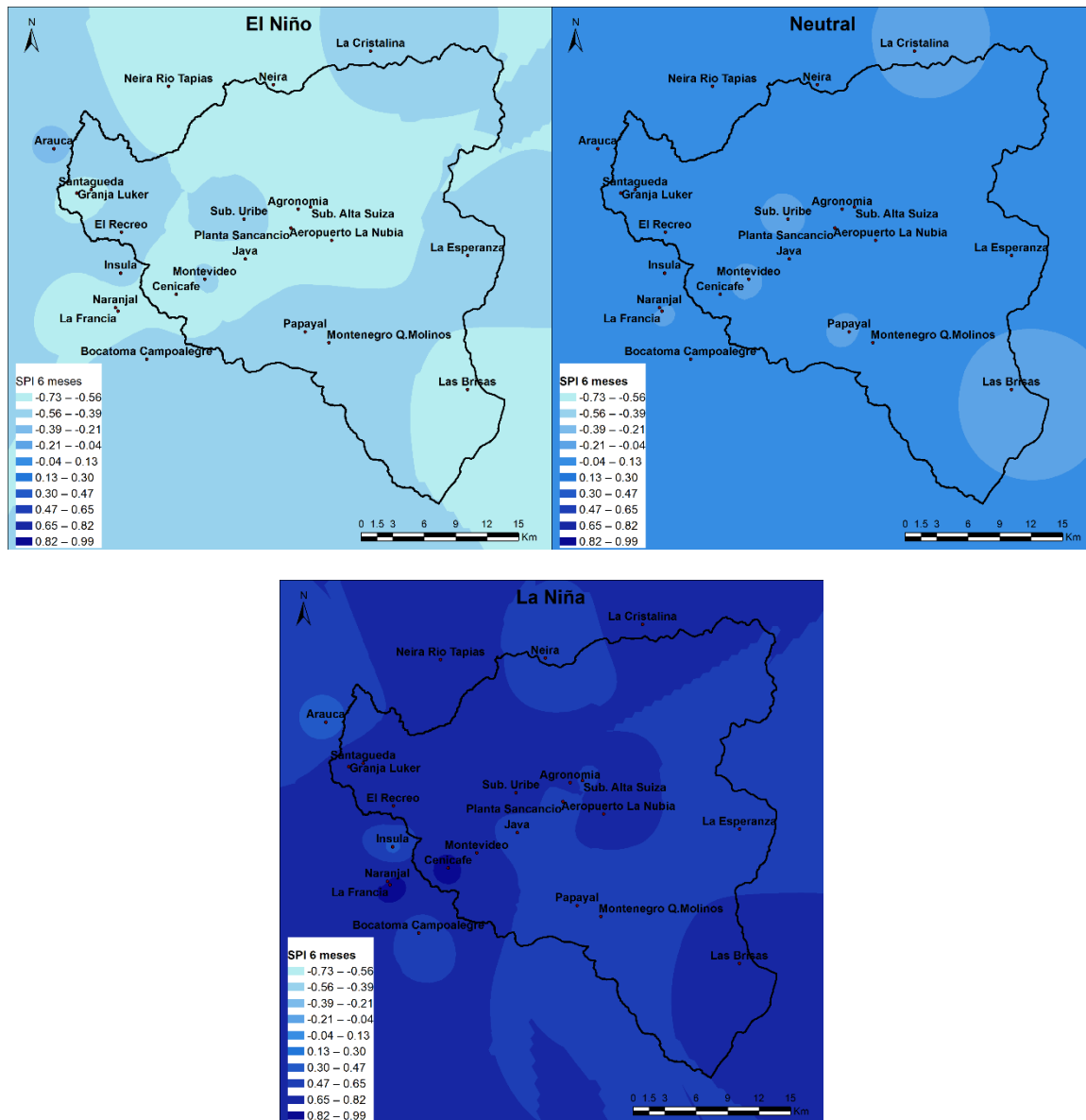


En la **Figura 4-83**, se establecen mucho más los tiempos prolongados de humedades y sequías, es de destacar el mes de noviembre, en el cual la fase El Niño se comporta sin mucha diferencia con los periodos neutrales, sin embargo, la fase La Niña presenta la mayor diferencia en este mes.

Figura 4-83: Efectos del ENSO en el SPI (6 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).

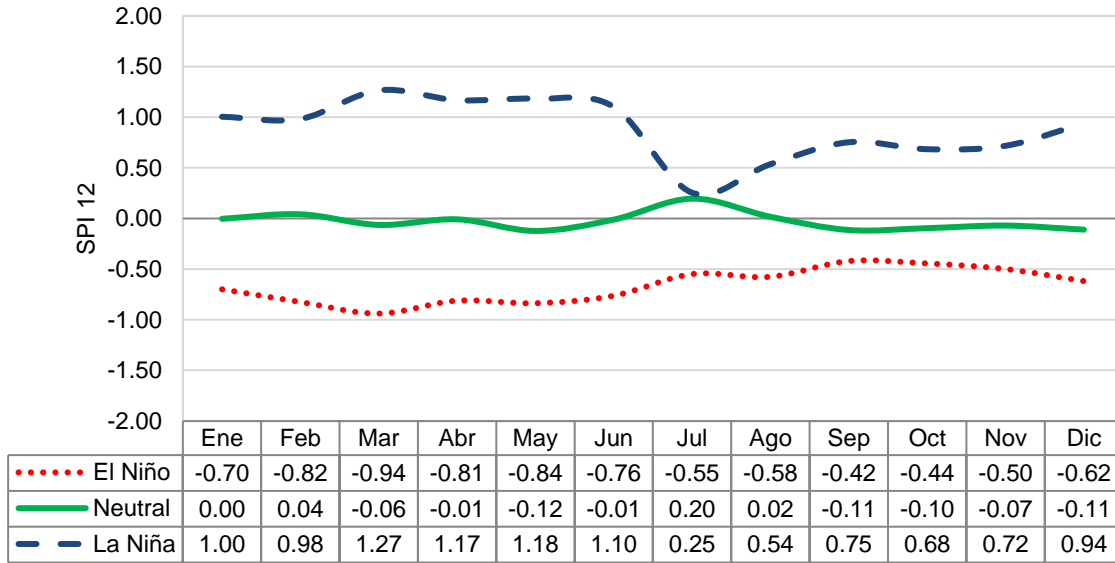


En la **Figura 4-84** se observa cómo durante la fase neutra, el PSI 6 es más homogéneo en toda la cuenca, sin embargo, en las fases El Niño y La Niña se presentan cambios en la mayor parte de la región.

Figura 4-84: SPI 6 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).

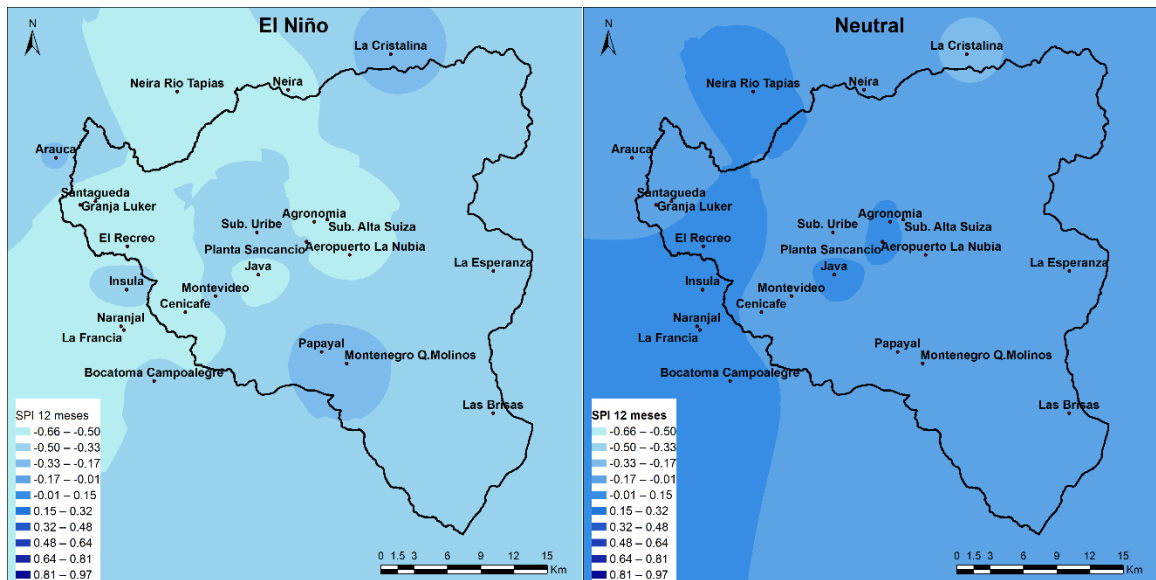
En el SPI 12, la fase La Niña se presenta con mayor variación, en comparación con el SPI 6, pero en el mes de julio vuelve a comportarse como la fase neutra, **Figura 4-85**. La fase El Niño, permanece alejado de la fase neutra indicando que se pueden producir largos periodos de sequía, aunque no muy pronunciada.

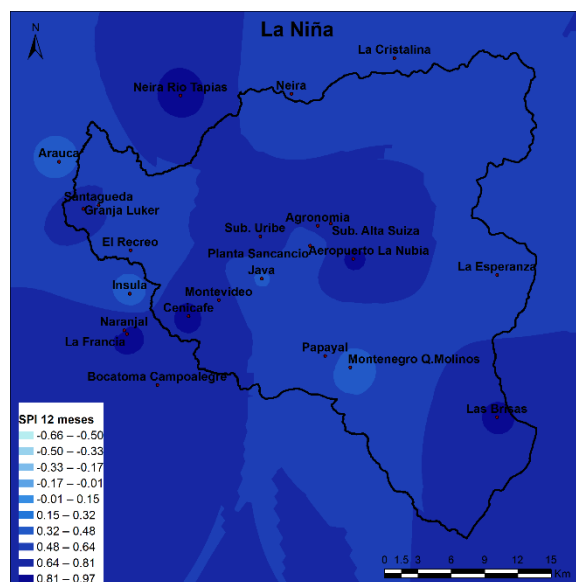
Figura 4-85: Efectos del ENSO en el SPI (12 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).



El comportamiento espacial del SPI 12, presentado en la **Figura 4-86**, es muy similar al SPI 6, durante El Niño, la cuenca baja tiende a presentar mayor déficit hídrico en comparación con la cuenca alta, el caso contrario ocurre en la fase neutra, donde la parte baja de la cuenca tiende a ser más húmeda. Durante La Niña, se presenta incremento de la humedad en toda la cuenca.

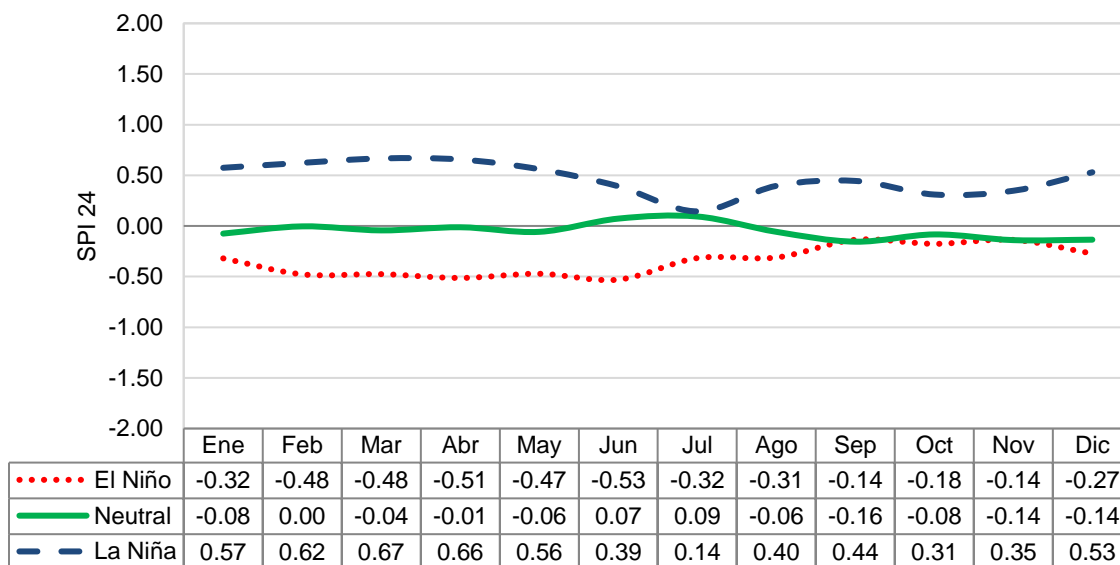
Figura 4-86: SPI 12 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).





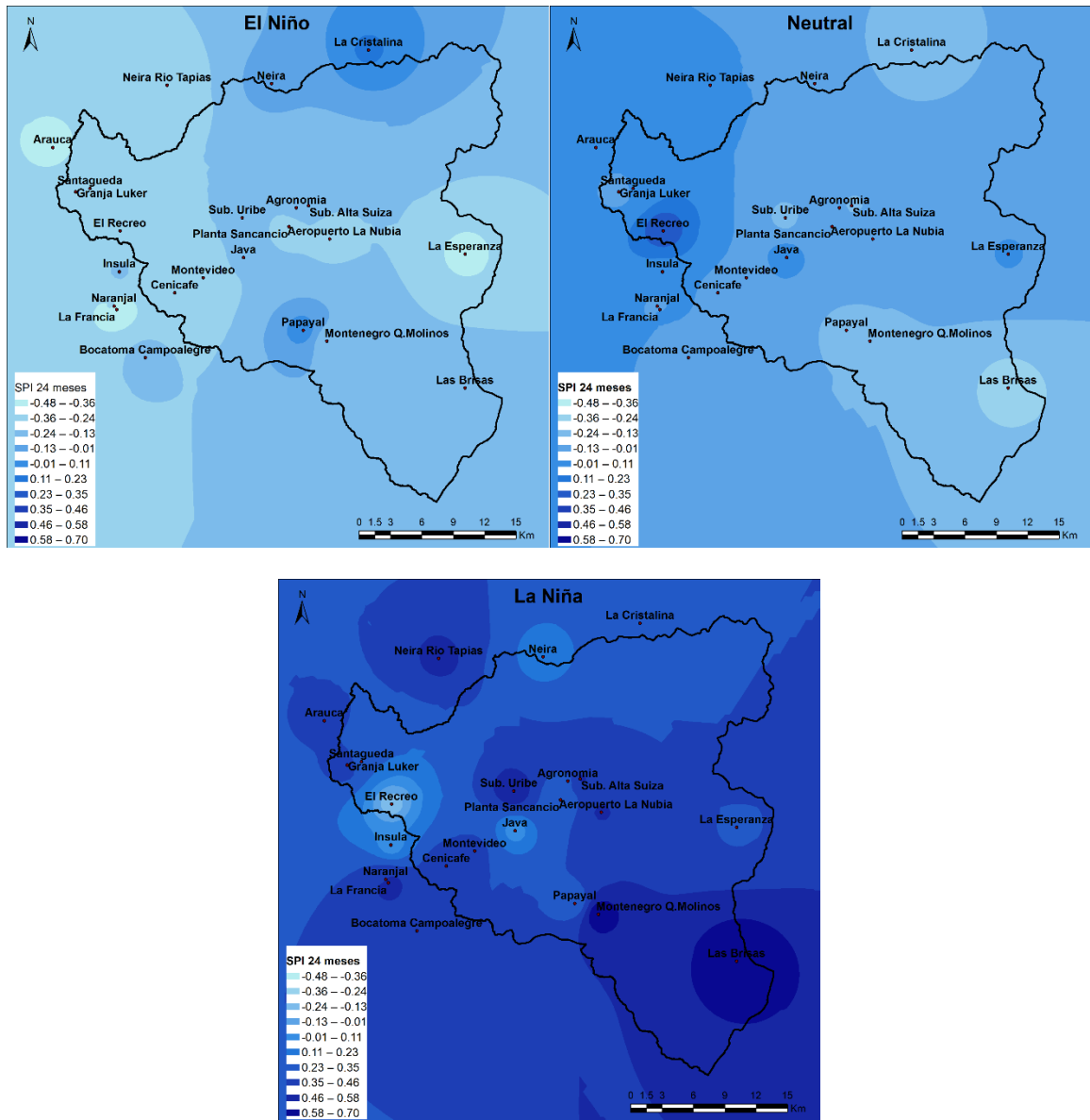
En el SPI 24 presentado en la **Figura 4-87**, las diferencias entre las fases no son tan pronunciadas como en los otros casos, se observa como durante los meses de septiembre a diciembre, en la fase El Niño, el comportamiento es igual a la fase neutra. La fase La Niña sigue presentando una variación durante todo el año, excepto en el mes de julio que se acerca a lo normal.

Figura 4-87: Efectos del ENSO en el SPI (24 meses), estación Cenicafé (1981 - 2010).



La distribución espacial de la cuenca del río Chinchiná presentada en la **Figura 4-88** para el SPI 24, presenta mucha variación durante cada una de las fases, en varias zonas de la cuenca existen variaciones en cuanto a la humedad y sequía, ocasionando que todo el territorio sea muy irregular, traduciéndose en diferentes intensidades de los eventos hidroclimáticos.

Figura 4-88: SPI 24 meses promedio para cada fase del ENSO (1981 - 2010).

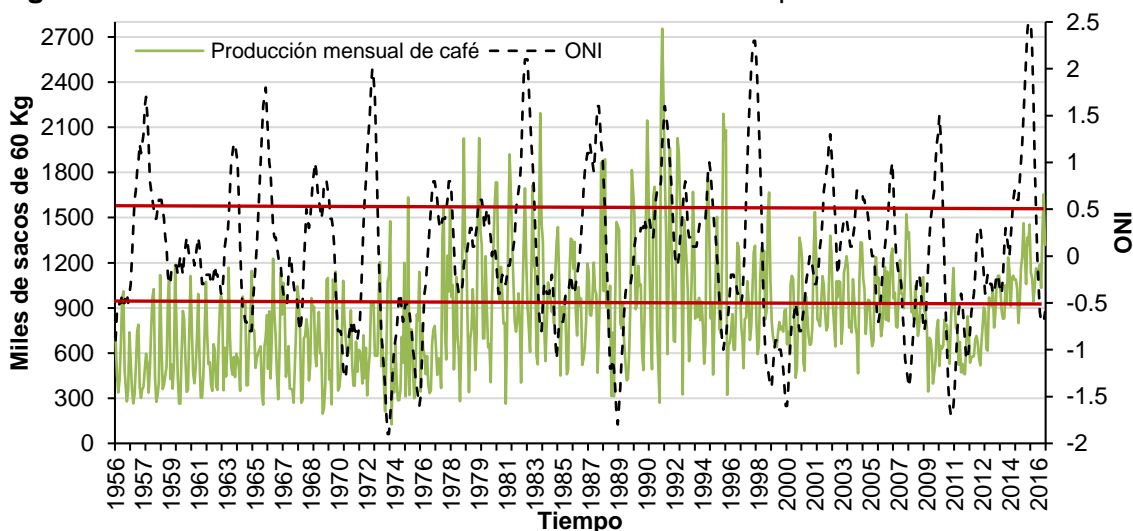


4.5 Impactos en la producción

4.5.1 Café a nivel nacional

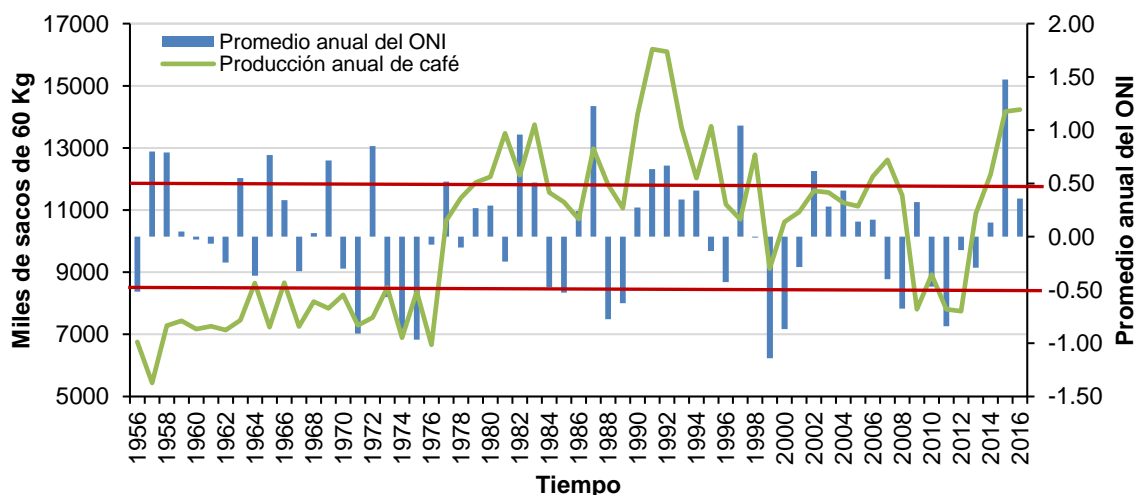
En la **Figura 4-89** se observa el comportamiento de la producción mensual nacional de café (1956 – 2016) en comparación con el índice ONI. Se alcanza a intuir que cuando se presenta un pico en el ONI fuera del rango ± 0.5 la producción en el periodo siguiente disminuye.

Figura 4-89: Producción histórica de café 1956 – 2016 comparada con el índice ONI.



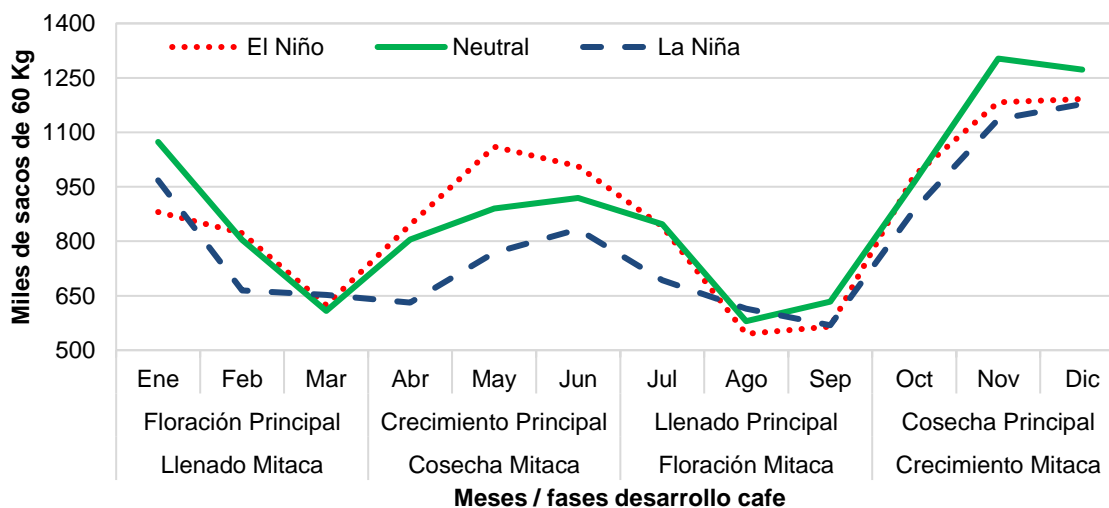
En la **Figura 4-90** se presenta la producción histórica anual nacional de café para el periodo 1956 – 2016 comparada con los valores promedio anuales del índice ONI, las líneas rojas representan el límite de $+0.5$ y -0.5 a partir del cual se definen las fases del ENSO.

Figura 4-90: Producción histórica anual de café 1956 – 2016 comparada con el promedio anual del índice ONI.



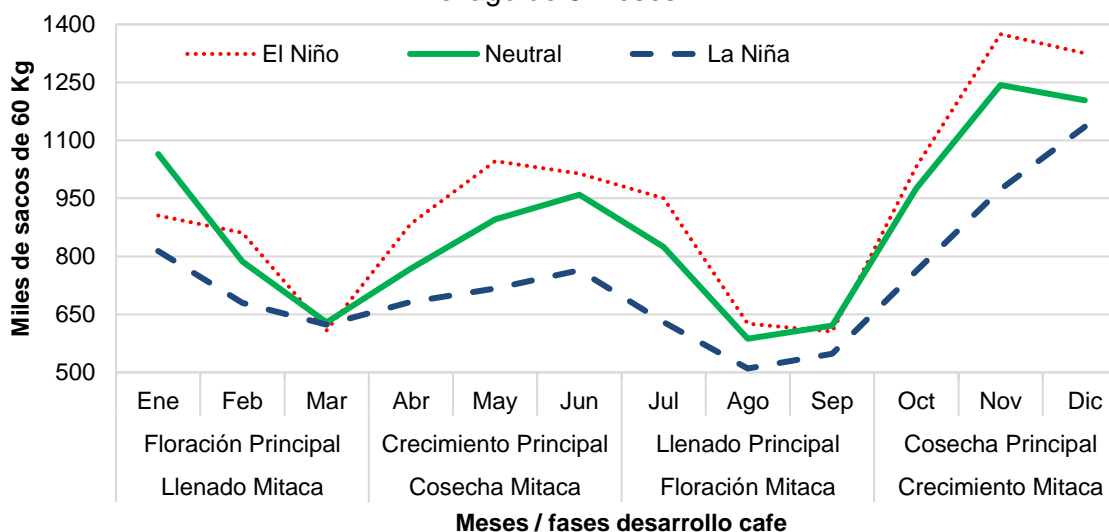
En la **Figura 4-91** se puede observar la producción histórica nacional de café desde 1956 – 2017 clasificada en las diferentes fases del ENSO y teniendo en cuenta la fase de desarrollo del cultivo. Se observa que para la cosecha principal los valores de producción son más bajos durante las fases El Niño y La Niña, siendo esta última la menor.

Figura 4-91: Producción histórica de café y fase de desarrollo del cultivo con el ENSO.



Teniendo en cuenta que entre el crecimiento y la cosecha hay un rango de 6 meses, se realizó un rezago de 6 meses de los datos, es decir, si se presentó una fase El Niño durante el crecimiento principal, se tomaron los datos de la cosecha principal inmediatamente siguiente para realizar la clasificación, los resultados se pueden ver en la **Figura 4-92**. Se observa que para la cosecha principal los valores de producción son más bajos cuando se presentó la fase La Niña en la época de crecimiento principal, mientras que cuando tuvo influencia El Niño durante el crecimiento, la producción siguiente es mayor comparada con una fase neutral.

Figura 4-92: Producción histórica de café y fase de desarrollo del cultivo con el ENSO, rezago de 6 meses.



En la **Figura 4-93** se presenta la producción anual histórica de café en cada fase del ENSO y en la **Figura 4-94** se presenta con rezago de 1 año. Se aprecia que la producción disminuye en el año inmediatamente siguiente cuando se presenta la fase La Niña y en los años que se presentan las dos fases El Niño y la Niña, aumentando la producción en las ocasiones en las que los años neutrales preceden el dato de producción. Sin embargo, cuando se presenta la fase El Niño la producción no varía mucho, esto puede ser debido a que ante la escasez de humedad los productores toman medidas para proveer del agua necesaria a los cultivos, mientras que en la fase La Niña no es tan sencillo eliminar el excedente de agua en el cultivo afectándolo en mayor medida.

Figura 4-93: Producción anual histórica de café en cada fase del ENSO.

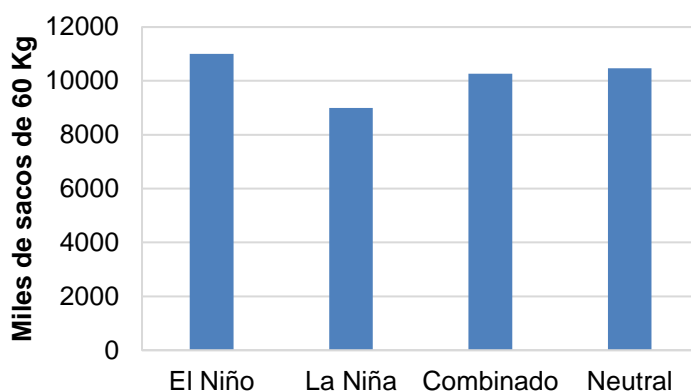
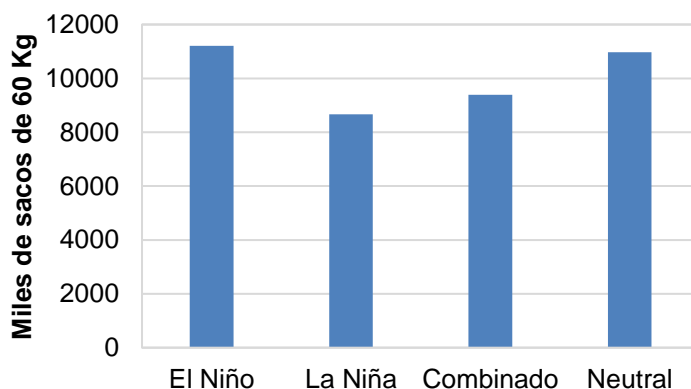


Figura 4-94: Producción anual histórica de café en cada fase el ENSO con rezago de 1 año.

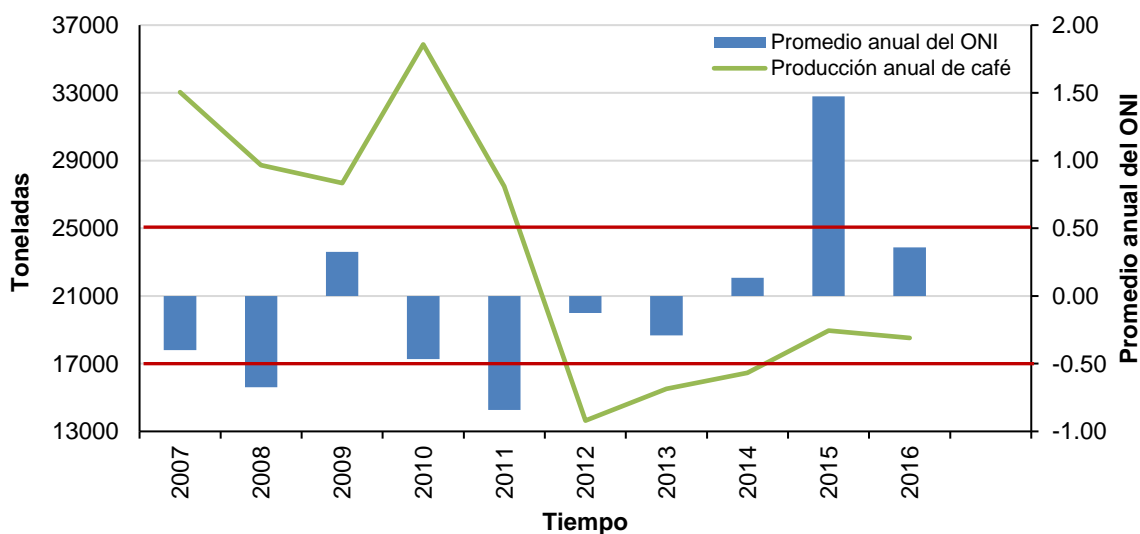


Considerando el periodo de tiempo 1956 – 2017, la producción durante la fase El Niño se incrementó un 5.1% con respecto a los años normales, se redujo -14.1% en periodos La Niña y una reducción de -2% en años con el fenómeno combinado. Sin embargo, cuando se analiza el rezago de 1 año, los datos de producción son: 2.1% aumento en la fase El Niño, -21% reducción en periodos La Niña y -14.4% de disminución en periodos combinados.

4.5.2 Café en la cuenca del río Chinchiná

En la **Figura 4-95** se presenta la producción de café para el periodo 2007 – 2016 en los municipios con presencia en la cuenca del río Chinchiná (Manizales, Villamaría, Palestina, Neira y Chinchiná), comparada con los valores promedio anuales del índice ONI, las líneas rojas representan el límite de +0.5 y -0.5 a partir del cual se definen las fases del ENSO. En la gráfica se observa como en el año siguiente después de haberse presentado El Niño o La Niña la producción bajó.

Figura 4-95: Producción anual de café en la cuenca del río Chinchiná comparada con el promedio anual del índice ONI (2007 – 2016).



La producción anual en la cuenca del río Chinchiná de café en cada fase del ENSO se presenta en la **Figura 4-96** y la producción con rezago de 1 año, en la **Figura 4-97**. La producción disminuye en el año inmediatamente siguiente cuando se presenta la fase La Niña, se observa incremento en las ocasiones en las que los años con fases combinadas, y mucho más en neutrales, preceden el dato de producción. En el caso de la fase El Niño no se presenta mayor variación.

Figura 4-96: Producción anual de café en la cuenca del río Chinchiná en cada fase del ENSO.

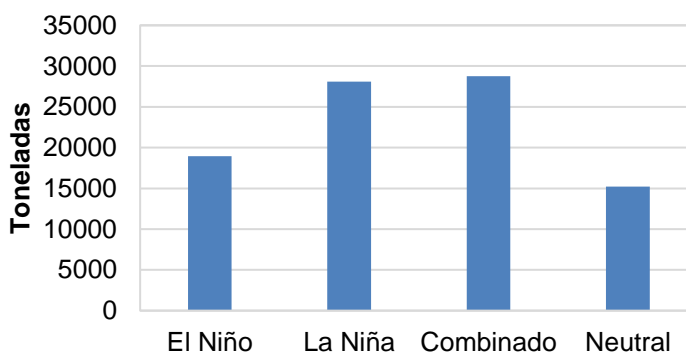
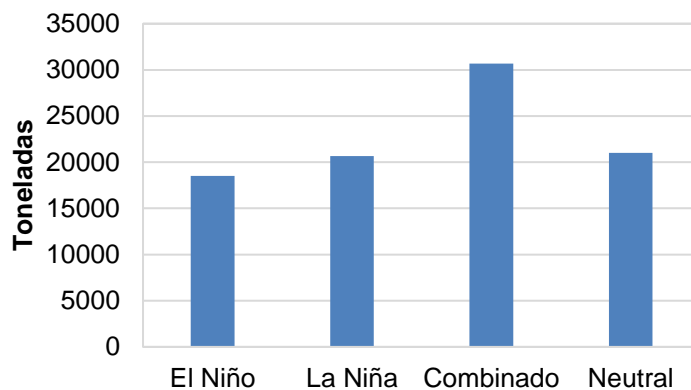


Figura 4-97: Producción anual de café en la cuenca del río Chinchiná en cada fase el ENSO con rezago de 1 año.



De acuerdo a lo mencionado en la sección 3.8 sobre las condiciones necesarias para una apropiada floración del cultivo y mediante los resultados obtenidos de las relaciones con el ENSO en la sección 4.4, se puede decir que:

De acuerdo a los cálculos diarios obtenidos para la amplitud térmica, no se presenta una deficiencia de temperatura inferior a 10°C durante 50 días consecutivos para ninguna fase del ENSO en las estaciones analizadas en la parte baja y media de la cuenca (zona cafetera). Esto quiere decir, que sin importar la fase del ENSO en que se encuentre la región, la AT siempre va a ser adecuada para una correcta floración. Si bien se presentan datos de amplitud térmica por debajo de 10°C, estos no son consecutivos y no alcanzan a permanecer 50 días bajo ese rango.

Los resultados de la sección 4.4.4 demuestran que el promedio de brillo solar diario en la zona cafetera de la cuenca es de 4.6 horas para la fase La Niña, 5.3 horas en El Niño y 4.9 horas en la fase neutral. Esto indica que la floración del cultivo se ve afectada por el brillo solar en la fase La Niña, ya que no se encuentra dentro del rango óptimo (4.8 - 7.5 horas) para una buena floración.

En la sección 4.4.2 se puede observar que la temperatura media en cada una de las fases del ENSO se encuentra dentro del rango de 17°C a 23°C, de acuerdo a esto se cumple la condición necesaria de temperatura media apropiada para la correcta floración.

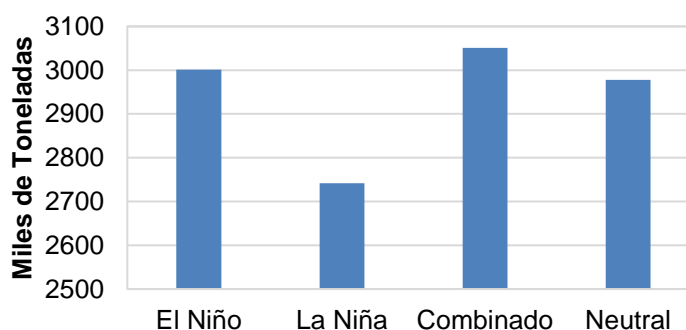
En cuanto al tiempo térmico en la zona cafetera, los resultados acumulados trimestrales para cada fase del ENSO se presentan en la **Tabla 4-20**. Teniendo en cuenta el mínimo acumulado trimestral de 1100°C recomendado por Ramírez et al., (2013), en ninguna fase del ENSO los grados de calor trimestrales necesarios para el adecuado desarrollo de la floración del cultivo se ven afectados.

Tabla 4-20: TT acumulado promedio por trimestres en cada fase del ENSO (1981-2010).

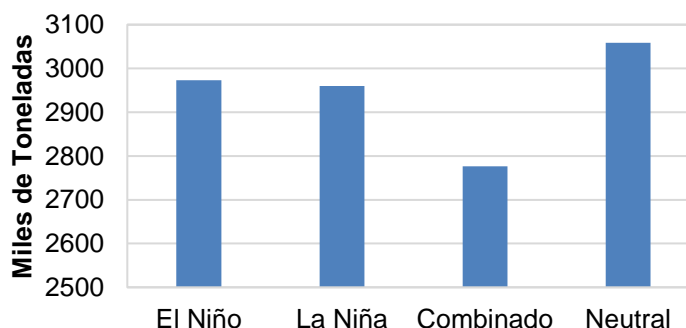
TT	El Niño	Neutral	La Niña
Trimestre 1	9481	14709	6428
Trimestre 2	6992	18055	5218
Trimestre 3	8413	15946	6295
Trimestre 4	9784	11690	7658

4.5.3 Plátano a nivel nacional

Tomando en cuenta los registros nacionales de producción de plátano desde 1992 hasta 2016 se clasificó en cada fase del ENSO. De esta manera como se observa en la **Figura 4-98** la producción de este cultivo es muy baja durante los años con fase La Niña presentando una anomalía respecto a los años neutrales de -7.9%, sin embargo, cuando se presentan fases combinadas se observan mejores datos de producción, mientras que se mantiene estable cuando ocurre El Niño respecto a la fase Neutral del ENSO.

Figura 4-98: Producción de plátano y el efecto del ENSO.

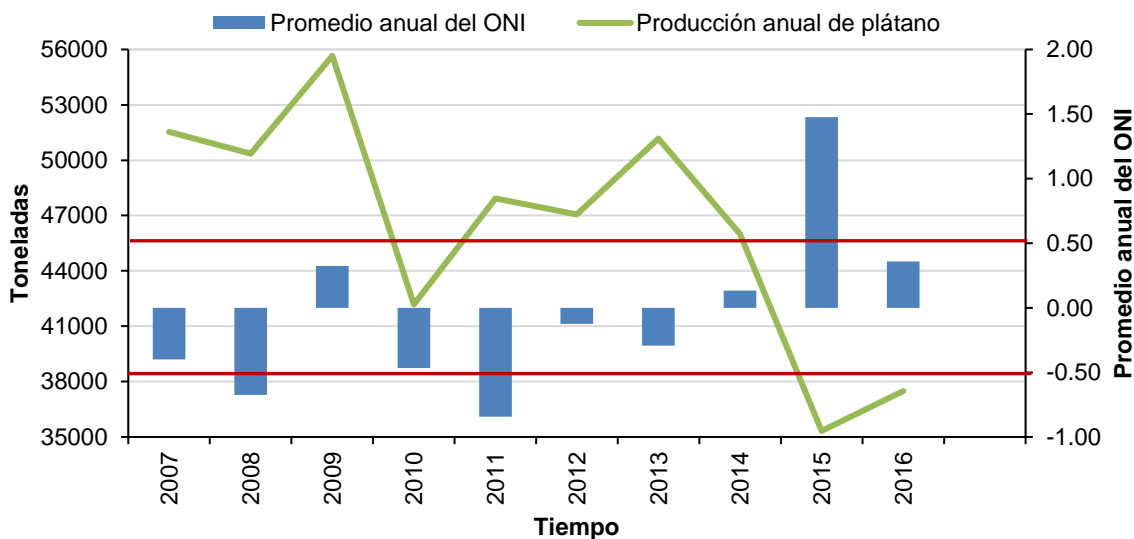
Pero teniendo en cuenta que las producciones de plátano son anuales (aproximadamente se presentan 1.2 racimos al año), se realizó un rezago de 1 año para verificar que ocurre al siguiente año de haberse presentado una fase del ENSO. Los resultados se presentan en la **Figura 4-99**, en donde se aprecia claramente que cualquier fase afecta la producción del año inmediatamente siguiente, y si se presenta un año con fases combinadas la producción es mucho más baja, con una anomalía de -9.2% respecto a años neutrales. En las fases El Niño y La Niña las anomalías son -2.8% y -3.2% respectivamente.

Figura 4-99: Producción de plátano y el efecto del ENSO con rezago de 1 año.

4.5.4 Plátano en la cuenca del río Chinchiná

La producción de plátano para el periodo 2007 – 2016 para la cuenca del río Chinchiná, se presenta en la **Figura 4-100**. Se realiza la comparación con los valores promedio anuales del índice ONI, las líneas rojas representan el límite de +0.5 y -0.5 a partir del cual se definen las fases del ENSO. A diferencia del café, no se aprecia una disminución definida en la producción después de haberse presentado una fase El Niño o La Niña.

Figura 4-100: Producción anual de plátano en la cuenca del río Chinchiná comparada con el promedio anual del índice ONI (2007 – 2016).



En la **Figura 4-101** se presenta la producción de plátano en la cuenca del río Chinchiná clasificada en las diferentes fases del ENSO y en la **Figura 4-102** con rezago de 1 año. A diferencia del nivel nacional, no se aprecia un cambio significativo en la producción a causa de las fases El Niño o La Niña para el periodo de años analizado realizando el rezago de 1 año. Al contrario, aumento levemente el valor durante El Niño, La Niña y años combinados, y disminuyó durante años neutrales.

Figura 4-101: Producción anual de plátano en la cuenca del río Chinchiná en cada fase del ENSO (2007 - 2016).

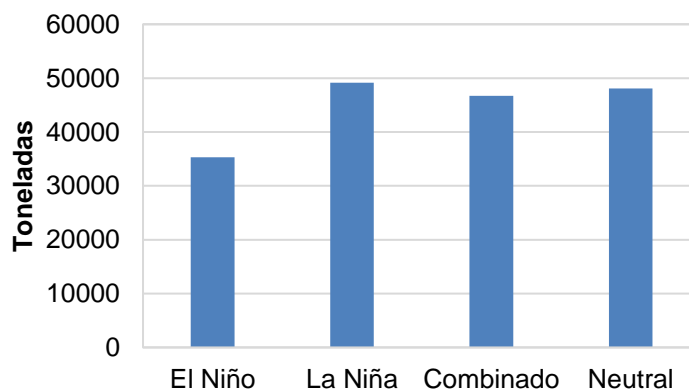
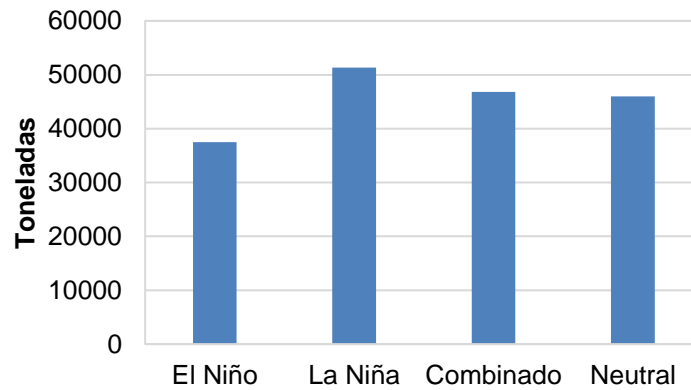


Figura 4-102: Producción anual de plátano en la cuenca del río Chinchiná en cada fase del ENSO con rezago de 1 año (2007 – 2016).



Según los cálculos de la sección 4.4.2, la temperatura media en la parte media-baja y baja de la cuenca se mantiene sobre los 20°C en cada una de las fases del ENSO, esta temperatura se encuentra dentro del rango para el crecimiento apropiado de los cultivos de plátano, 20°C a 30°C (Agrosiembra, 2017), por lo que no se produce una afectación en cuanto a temperatura media en la producción del plátano. Otro aspecto importante es la distribución de las precipitaciones durante el año, según los resultados del ICP de la sección 4.4.8, la cuenca se caracteriza por poseer una distribución promedio de las lluvias moderadamente estacional durante El Niño, y uniforme en las fases La Niña y neutral, es decir, se presentan lluvias en cada uno de los meses del año, estado óptimo para el adecuado desarrollo del plátano (Ministerio de agricultura, 2014).

5. Conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación

5.1 Conclusiones

Esta investigación presenta el efecto de la variabilidad climática en la cuenca del río Chinchiná sobre las variables agroclimáticas y los impactos en los principales cultivos, analizado mediante la estimación de índices agroclimáticos empleando estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná, la determinación de los patrones espaciales y temporales de los índices agroclimáticos calculados, la estimación de relaciones entre índices de variabilidad climática y agroclimáticos con correlaciones que se clasificaron como débiles, moderadas y fuertes. Los efectos del ENSO en la producción de los cultivos de café y plátano también fueron evaluados.

Los diferentes índices agroclimáticos evaluados indican afectación sobre los cultivos seleccionados de café y plátano, ya que se encuentran basados en energía y humedad, componentes esenciales para un correcto desarrollo del cultivo.

La erosividad de la lluvia en la cuenca del río Chinchiná se clasifica como moderada en la cuenca alta, alta en la media y muy alta en la cuenca baja. La distribución de la precipitación es uniforme y moderadamente estacional.

Las variables climáticas y los índices agroclimáticos presentan una fuerte relación e influencia con respecto a la elevación en la cuenca del río Chinchiná, marcando las diferencias entre los rangos de la cuenca baja, media y alta. La precipitación, la temperatura, el brillo solar, el tiempo térmico, la amplitud térmica, el índice de Fournier modificado y el índice de erosividad, presentan valores mayores en la cuenca baja y menores en la cuenca alta. La humedad relativa, el déficit de brillo solar y el índice de concentración de la precipitación manifiestan valores inferiores en la cuenca baja y superiores en la cuenca alta.

El comportamiento temporal y espacial de cada índice agroclimático es similar entre sí y todos se encuentran afectados por las diferentes fases del ENSO dentro de la cuenca del río Chinchiná.

En general, el índice Oceánico de El Niño – ONI, fue el que mejores coeficientes de correlación presentó con las variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar) y con los índices agroclimáticos. Los valores corresponden a correlaciones débiles, moderadas y fuertes, siendo la variable climática con mejor

correlación la temperatura y el índice agroclimático con mejor correlación el tiempo térmico, ambos con valores máximos de 0.75.

El análisis muestra que los índices con mayor influencia en el clima de la cuenca del río Chinchiná son el ONI, el MEI, el BEST y el SOI, para todas las variables e índices agroclimáticos, y adicionalmente los índices de las regiones Niño 1+2, 3, 4 y 3,4 para la temperatura y el tiempo térmico, siendo el ONI el que mejor correlación demostró en todos los casos. De acuerdo a esto, el ENSO es el que más afecta el clima en la cuenca del río Chinchiná, y se valida la afirmación que este tipo de variabilidad climática es la que tiene mayor influencia en el clima del país.

Existen relaciones directas entre las variables climáticas y los índices climáticos. La precipitación, la humedad relativa y el brillo solar se correlacionan mejor con los índices climáticos sin ningún rezago, mientras que la temperatura presenta valores más altos de correlación cuando se realiza un rezago de 1 mes.

Índices agroclimáticos como la amplitud térmica y el tiempo térmico presentan mejores correlaciones con los índices climáticos con rezago de 1 mes. Para el déficit de brillo solar y el índice estandarizado de precipitación se obtienen mejores valores de correlación sin rezagos.

Se demostró que el índice del Pacífico Oeste (WP) no presenta ninguna influencia sobre el clima de la cuenca del río Chinchiná. En adición, los índices Oscilación del Atlántico Norte (NAO), Atlántico Sur Tropical (TSA) y el Patrón del Pacífico y América del Norte (PNA), presentan relaciones muy débiles.

Los efectos de la variabilidad climática producidos por el ENSO en la cuenca del río Chinchiná reflejan comportamientos diferentes según la condición hidrológica (El Niño, La Niña y Neutral) sobre las variables climáticas y los índices agroclimáticos. La precipitación, la humedad relativa, el déficit de brillo solar, el índice de Fournier modificado, el índice de erosividad y el índice estandarizado de precipitación presentan valores más bajos durante El Niño y más altos durante La Niña en comparación con la fase Neutral. La temperatura, el brillo solar, el tiempo térmico, la amplitud térmica y el índice de concentración de la precipitación aumentan sus valores durante la fase El Niño y son inferiores en La Niña.

En la cuenca del río Chinchiná se tienen variaciones del brillo solar con el ENSO, estas son 4.6 horas/día para la fase La Niña, 5.3 horas/día en El Niño y 4.9 horas/día en la fase neutra. El cultivo de café necesita entre 4.8 y 7.5 horas/día de brillo solar para tener una buena floración, de acuerdo a esto, el brillo solar durante la fase La Niña puede afectar la correcta floración del café y en consecuencia su producción.

La amplitud térmica en la zona cafetera de la cuenca del río Chinchiná (media-baja) no presenta valores continuos durante 50 días inferiores a 10°C en ninguna fase del ENSO, indicando que es adecuada para una correcta floración.

El tiempo térmico en la zona cafetera de la cuenca del río Chinchiná, presenta acumulados trimestrales mayores a 1100°C en cada fase del ENSO, sobrepasando así los grados de calor mínimos necesarios para el adecuado desarrollo de la floración.

La temperatura media en la cuenca baja y media del río Chinchiná se mantiene sobre los 20°C en cada una de las fases del ENSO, esta temperatura al encontrarse dentro del rango de 20°C a 30°C, es apropiada para el correcto crecimiento de los cultivos de plátano.

La distribución de las precipitaciones durante el año en la cuenca del río Chinchiná, clasificadas como moderadamente estacionales durante El Niño, y uniforme cuando se presentan las fases La Niña y Neutral, representa un estado óptimo para el adecuado desarrollo del plátano.

Mediante los resultados a escala nacional se presentan relaciones directas y significativas entre la producción de café, plátano y el ENSO; en el plátano especialmente se presenta una alta variabilidad cuando las fases El Niño y La Niña ocurren en un mismo año.

Las alteraciones en las variables climatológicas y en los índices agroclimáticos favorecen la producción cafetera en periodos El Niño, no obstante, en la fase La Niña actúan en contra. Se debe tener en cuenta que excesivos periodos de sequía pueden afectar el desarrollo normal de los cultivos.

Según el análisis realizado la producción de plátano se ve afectada cuando en el año inmediatamente anterior se presentó una fase El Niño, La Niña o ambos, sin embargo este no es el único factor que afecta la producción, existen muchos otros como plagas, enfermedades, fertilización que influyen en el proceso, es por esto que los resultados obtenidos se deben tomar con precaución y de una forma preliminar mientras se realizan más estudios que involucren otros componentes y puedan corroborar los resultados obtenidos en esta investigación.

A partir de los resultados obtenidos, los cultivos de café y plátano en la cuenca del río Chinchiná no siguen la misma tendencia del nivel nacional, sin embargo, no se puede asegurar esto, ya que el número de años clasificados como El Niño o La Niña utilizados en el análisis son muy escasos, es necesario validar estos resultados a medida que se obtiene mayor número de años e información.

Los diferentes resultados obtenidos aportan importante información sobre el comportamiento de diferentes variables climatológicas e índices agroclimáticos con la variabilidad climática en la cuenca del río Chinchiná, que pueden afectar de manera significativa la producción de los diferentes cultivos dentro de la cuenca.

Lo novedoso que sale de esta investigación radica en poder validar los comportamientos de variables como la precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar e índices agroclimáticos como la amplitud térmica, el tiempo térmico, el déficit de brillo solar, el índice estandarizado de precipitación, el índice de concentración de la precipitación, el índice de Fournier modificado y el índice de erosividad con cada una de las fases del ENSO, ver su comportamiento temporal y espacial en la cuenca del río Chinchiná..

También en identificar en la cuenca del río Chinchiná cuales son algunos de los índices climáticos representantes de fenómenos de variabilidad climática que afectan el clima de la región.

Brindarles a los agricultores una herramienta para mejorar el conocimiento sobre los efectos del ENSO en cada una de sus fases, frente a la producción de los cultivos, en especial de café y plátano.

5.2 Recomendaciones

Dado el nivel de información de producción de los cultivos disponible en la cuenca del río Chinchiná, el análisis de producción presentado es general con datos tomados de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales, Encuestas Nacionales Agropecuarias, Banco Interamericano de Desarrollo y de la Federación Nacional de Cafeteros. Por este motivo se recomienda a futuro, cuando se presenten datos propios de la cuenca con un rango de por lo menos 30 años, realizar un análisis más concreto para la zona y teniendo en cuenta otros cultivos.

Se debe poner cuidado con el análisis anual realizado con cada fase del ENSO, ya que, por la cantidad de datos, el número de eventos El Niño o La Niña es inferior a 30, el cual es el número mínimo sugerido para poder obtener resultados estadísticamente aceptables, por este motivo es necesario seguir actualizando los resultados acá expuestos a medida que se obtiene mejor información y mayor número de años de datos.

El estudio del clima actual y pasado es fundamental para comprender mejor la variabilidad climática y poder realizar mejoras en todos los sectores hacia el futuro, por esto es necesario seguir fortaleciendo las redes de monitoreo y la investigación en estos temas, ya que teniendo buena información histórica es posible realizar mejores análisis y más complejos.

5.3 Futuras líneas de investigación

Se propone un estudio de las redes de monitoreo que permita instrumentar mejor la cuenca del río Chinchiná, para que los análisis espaciales sean óptimos y representen de una mejor manera los resultados.

Se propone investigar y utilizar otros métodos de minería y de análisis de datos que permitan contrastar y validar los resultados acá presentados.

Series temporales más largas permiten mejorar el análisis y las conclusiones, por lo que este tipo de estudios se deben actualizar periódicamente.

Buscar otras metodologías de análisis que permitan comprender el ENSO y sus efectos en la cuenca del río Chinchiná.

6. Bibliografía

- Agrosiembra. (2017). Recuperado de http://www.agrosiembra.com/?NAME=r_c_description&c_id=228
- Alcaldía de Manizales. (2003). Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales 2003-2005. Recuperado de www.manizales.gov.co
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B. y Klein Tank, A. M. G., et al. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111.
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D. y Ruiz, J. F. (2014a). Análisis compuesto según el índice ENSO ONI, para la temperatura media trimestral de Colombia. IDEAM. Recuperado de <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/2456>
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D. y Ruiz, J. F. (2014b). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al Ciclo El Niño, la Niña – Oscilación del Sur (ENSO). IDEAM. Recuperado de <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/2456>
- Arcila, J. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia. CENICAFE. Federación Nacional de Cafeteros.
- Arévalo, A. y Andrés, V. (2010). Una reconstrucción racional de la historia de la Ciencia: Análisis de la Teoría de los ciclos de Milankovitch y el surgimiento de la Climatología.
- Aristizábal, M. y Jaramillo, C. (2010). Identificación y descripción de las etapas de crecimiento del plátano Dominicano Hartón (*Musa AAB*). *Agro*, 18(1), 29-40.
- Arnoldus, H. M. J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*. 34: 39-48.
- Arnoldus, H. M. J. (1980). An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss equation. In: De Boodt, M. and Gabriels, D., Eds., *Assessment of Erosion*, John Wiley and Sons, New York, 127-132.
- Ávila Díaz, Á. J., Carvajal Escobar, Y. y Gutiérrez Serna, S. E. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, Vol. 18, No. 41, p. 120-133.
- Badii, M. H., Guillen, A., Lugo Serrato, O. P. y Aguilar Garnica, J. J. (2014). Correlación No-Paramétrica y su Aplicación en la Investigaciones Científica Non-Parametric Correlation and Its Application in Scientific Research. *International Journal of Good Conscience*, 9(2), 31-40.
- Banco de la República. (2007). El fenómeno del Niño y su posible impacto en Colombia. Bogotá: Banco de la República.
- Barnston, A. G., y Livezey, R. E. (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly weather review*, 115(6), 1083-1126.
- BBC Mundo. (2011). ¿Cómo ocurre El Niño y La Niña? Londres, Inglaterra. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=nDJUPk6iVRQ>
- Belalcázar, S. (1991). El Cultivo del Plátano en el trópico. Manual de Asistencia Técnica N° 50. Instituto Colombiano Agropecuario ICA. Armenia.
- Benning, J., Herzmann, D., Ingels, C. y Wilke, A. (2011). Agriculture and weather variability in the corn belt: northwest south Dakota. United States Department of Agriculture.
- Berlato, M. A. y Fontana, D. C. (2001). Impacts of el niño and la niña on agricultural production in southern brazil and the use of climate forecasts in agriculture. *Passo Fundo: Embrapa Trigo*, 2001. p.217-241.

- Besteiro, S. I. y Delgado, M. I. (2011). Evaluación de la agresividad de las precipitaciones en la cuenca del Arroyo El Pescado, provincia de Buenos Aires (Argentina). *1Rev. Fac. Agron.* Vol 110 (2): 82- 90
- Bezabih, M., Di Falco, S. y Mekonnen, A. (2014). On the impact of weather variability and climate change on agricultura: evidence from Ethiopia. *Environment for development.*
- Botero, B.A. (2015). Análisis estadístico de variables hidroclimatológicas. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Apuntes de clase.
- Breña Puyol, A. F. y Jacobo Villa, M. A. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Brown, R. y Rosenberg, N. J. (1997). Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA, In *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 83, Issues 3–4, 1997, Pages 171-203, ISSN 0168-1923, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02352-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02352-0).
- Cadena, M. C., Devis, D., Igor, C. M., Ortiz, J. R., & Pabón, J. D. (2004). En Tumaco: fenómenos del niño y la niña. Eventos ENOS y su relación con el clima y la producción de palma de aceite. *Revista Palmas*, 25(4), 46-62.
- Calderón, L. F. (2017). Estimación y análisis de la evapotranspiración en el municipio de Manizales. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Camargo, A. P. (1985). O clima e a cafeticultura no Brasil. *Inf. Agropec.* 11, 13–26.
- Camayo, G., Chaves, B., Arcila, J. y Jaramillo, A. (2003). Desarrollo floral del cafeto y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná Caldas. *Revista Cenicafe*, 54, 35-49. Recuperado de [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc054\(01\)035-049.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc054(01)035-049.pdf)
- Campos Aranda, D. (1992). Proceso del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª ed. San Luis Potosí, México. p. 22-23.
- Cannell, M. G. (1976). Crop physiological aspects of coffee bean yield – a review. *Kenya Coffee* 41, 245-253.
- Carr, M. K. V., (2001). The water relations and irrigation requirements of coffee. *Experimental Agriculture* 37 (1), 1–36.
- Castaño, Á. M., Aristizábal, M. y González, H. (2012). Requerimientos hídricos del plátano dominico-hartón (*Musa AAB Simmonds*) en la región santágueda (Palestina, Caldas). *Rev. UDCA Act. y Div. Cient.(Colombia)*, 15(2), 331-338. CENICAFE. Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2010): Guía Ambiental del sector cafetero.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - CMNUCC. (2007). Unidos por el clima. Bonn Alemania.
- Conde C., Ferrer R. y Orozco S. (2006). Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS. (2005). Caracterización de la cuenca del Río Chinchiná. Manizales: CORPOCALDAS.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS. (2013). Plan De Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná en el Departamento de Caldas. Síntesis del diagnóstico.
- CORPOCALDAS, ASOCARS y Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. (2015). Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el departamento de Caldas - POMCA Chinchiná. Manizales.
- Cortés, A. C. (2010). Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña andina. Caso de estudio: Manizales.
- CORTOLIMA, Universidad Nacional de Colombia y Centro de Estudios para la Prevención de Desastres - CEPREVÉ. (2015). INFORME FINAL. Contrato Interadministrativo No. 052-2013. Ibagué.
- Dai, A. (2006). Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *Journal of climate*, 19, 3589-3606.
- DaMatta, F. M., Chaves, A. R. M., Pinheiro, H. A., Ducatti, C. y Loureiro, M. E. (2003). Drought tolerance of two field-grown clones of *Coffea canephora*. *Plant Sci.* 164 (1), 111–117.

- Departamento Nacional de Planeación – DNP. (2012). El análisis de los impactos económicos del cambio climático para Colombia utilizando el Modelo de Equilibrio General Computable. Bogotá: DNP.
- Donner, S. D. y Kucharik, C. J. (2003). Evaluating the impacts of land management and climate variability on crop production and nitrate export across the Upper Mississippi Basin, *Global Biogeochem. Cycles*, 17, 1085, doi:10.1029/2001GB001808, 3.
- Doorenbos, J. y Kassam, A. H. (1980). Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio de Riego y Drenaje N° 33. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. Roma
- Dore, M. H. (2005). *Climate Change and changes in global precipitation patterns: What do we know?* St Catharines, Canada: Climate Change Laboratory, Brock University.
- Duque, E. (2013). Geología en la cuenca del río Chinchiná. Comunicación personal. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Duque, E., Duque, G. y Murillo, C. (2009). Geomecánica de laderas en Manizales. Foro: Gestión del riesgo por inestabilidad de terrenos en Manizales, 13 de agosto de 2009, Manizales.
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., Mayer, D. A. y Cid-Serrano, L. (1999). How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7841-7848.
- Eslava, J. (1993). Climatología y diversidad climática de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol.18, No.71, p. 507-538. Bogotá.
- Fallas, J y Valverde, C. (2007). Inundaciones en Costa Rica y estudio de caso en una cuenca forestada del Caribe Costarricense: Evidencia de los últimos 34 años. Congreso Geoprocetamiento 2007. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.
- Ferro, V., Giordano, G. y Lovino, M. (1991). Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrological Sciences Journal*, 36(6), 549-564.
- Ferro, V., Porto, P. y Yu, B. (1999). A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeastern Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 44(1), 3-24.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – FNC. (2011). Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2011.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – FNC. (2012a). Caficultura Sostenible. Informe del Gerente General. 2012
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – FNC. (2012b). Caficultura Sostenible. Informe de Comités Departamentales. 2012
- Frank, D. C., Esper, J., Raible, C. C., Buntgen, U., Trouet, V., Stocker, B. y Joos, F. (2010). Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. *Nature* 463, 527–530.
- Gabriels, D., Vermeulen, A., Verbist, K. y Meirvenne, V. (2003). Assessment of rain erosivity and precipitation concentration in Europe. In *Proceedings of the International Symposium* (Vol. 25, pp. 87-92).
- Gliessman, S. R. (2002). Agro ecología. Procesos ecológicos en agricultura sostenible. CATIE, C.R. 359 p.
- González, C. (2007). Producción de Café en Honduras: Modelado de las Relaciones Cafeto-Arbolado. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. 212 p.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático – IPCC. (2001). Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis. Ginebra, Suiza.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático – IPCC. (2007). Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Ginebra, Suiza.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático – IPCC. (2008). El Cambio Climático y el agua. Ginebra, Suiza.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. (2012). Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Ginebra. Suiza.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. (2013). Resumen Técnico. Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución de Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

- Recuperado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf.
- Guarín, G. G. W. (2011). Impacto de la Variabilidad Climática en la Producción de Banano en el Urabá Antioqueño. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Hansen, J. W., Jones, J. W., Irmak, A. y Royce, F. (2001). Impacts of El Niño and Climate Variability on Agriculture: El Niño-Southern Oscillation Impacts on Crop Production in the Southeast United States. Rosenzweig, Cynthia. Madison, WI. DOI: 10.2134/asaspecpub63.c4
- Hellin, J. (2004). De erosión de suelos a suelos de calidad. LEISA. Revista agroecológica 19(4):75.
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M. y Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: the human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39, 16-25.
- Hutjes, R. W. A., Kabat, P., Running, S. W., Shuttleworth, W. J., Field, C., Bass, B., da Silva Dias, M. F., Avissar, R., Becker, A., Claussen, M., Dolman, A. J., Feddes, R. A., Fosberg, M., Fukushima, Y., Gash, J. H. C., Guenni, L., Hoff, H., Jarvis, P. G., Kayane, I., Krenke, A. N., Liu, C., Meybeck, M., Nobre, C. A., Oyebande, L., Pitman, A., Pielke Sr., R. A., Raupach, M., Saugier, B., Schulze, E. D., Sellers, P. J., Tenhunen, J. D., Valentini, R., Victoria, R. L. y Vorosmarty, C. J., (1998). Biospheric aspects of the hydrological cycle. *J. Hydrol.* 212–213, 1–21.
- Consejo Internacional del Café – ICC. (2009). El Cambio Climático y el Café. Londres, Inglaterra.
- INGEOMINAS. (1993). Mapa geológico de Caldas. Manizales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (1998). Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno Frío del Pacífico (La Niña) en Colombia en el segundo semestre de 1998 y primer semestre de 1999. Bogotá: IDEAM, 88 pp.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2005a). Atlas climatológico de Colombia. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2005b). Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogota. Imprenta Nacional.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2007). Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Subdirección de Meteorología. Bogotá D.C. – Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2009). Boletines informativos sobre el monitoreo del Fenómeno del Niño. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2009). Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Subdirección de meteorología. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2010). 2ª Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2014). Aspectos teóricos de la Metodología del Análisis Compuesto (AC) aplicada a estudios de variabilidad climática. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá: IDEAM.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Caldas. Bogotá. 2ª edición.
- Iskander, S. M., Rajib, M. A. y Rahman, M. M. (2014). Trending regional precipitation distribution and intensity: use of climatic indices. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4(03), 385.
- Jaramillo, A. (2005). Clima Andino y Café en Colombia. Chinchiná: Centro Nacional de Investigaciones del Café - CENICAFE.
- Jaramillo, A. (2005b). La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29(112):371-382.2005. ISSN 0370-3908.
- Jaramillo, A. (2011). La Variabilidad Climática y su influencia en la caficultura. RAMACAFE 2011. X Conferencia Internacional de Café. Managua, Nicaragua.
- Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Kamonjo, C., Jaramillo, A., Vega, F. E., Poehling, H-M. y

- Borgemeister, C. (2009). Thermal Tolerance of the Coffee Berry Borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PLoS One* 4:e6487
- Jiménez, M. (2014). Indicadores climáticos. Una manera para identificar la variabilidad climática a escala global.
- Jordán, A. y Bellinfante, N. (2000). Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología*, 7(3), 83-92.
- Jovel, R. (2000). El impacto del Fenómeno de El Niño de 1997-1998 en la comunidad andina de naciones. In *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres: EIRD Informa-América Latina y el Caribe: Reducción de Desastres, Educación y Juventud* (Vol. 1, No. 1, pp. 41-2). NU. *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD)*.
- Kandji S. y Verchot L. (2007). Impacts of and Adaptation to Climate Variability and Climate Change in the East African Community: A Focus on the Agricultural Sector. *World Agroforestry Centre (ICRAF)*.
- Knox, P., Griffin, M., Sarkar, R. y Ortiz, B. (2014). El Niño, La Niña and Climate Impacts on Agriculture: Southeastern U.S. *Southeast Climate Ext.*, Gainesville, FL.
- Laflen, J. M., y Moldenhauer, W. C. (2003). The USLE story. *World Association of Soil and Water Conservation (WASWC), Special Publication*, (1), 54.
- Lansigan, F. P., de los Santos, W. L. y Coladilla, J. O. (2000). Agronomic impacts of climate variability on rice production in the Philippines. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82 (2000) 129–137.
- Lavado, C. y Espinoza, C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las Lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorología*, 29, 171-182. <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862014000200003>
- León, Zea y Eslava. (2000). Circulación general del trópico y la Zona de Confluencia Intertropical en Colombia. *Meteorol. Colomb.* Vol. 1, p. 31-38. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Lin, Brenda. (2007): Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144 (2007) 875-94.
- Lince, L. A. y Castro, A. F. (2015). Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Revista Cenicafé* 66(1): 25-31. 2015
- Luis, M. D., González-Hidalgo, J. C., Raventós, J., Sánchez, J. R. y Cortina, J. (1997). Distribución espacial de la concentración y agresividad de la lluvia en el territorio de la comunidad Valenciana. *Cuaternario y Geomorfología*, 11(3-4). ISSN: 0214-1744
- Luis, M. D., Raventós, J., González-Hidalgo, J. C., Sánchez, J. R. y Cortina, J. (2000). Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain). *Int. J. Climatol*, 20(12), 1451-1469.
- Marín, J. P. (2017). Dinámica de los eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná por efecto de variabilidad climática. *Universidad Nacional de Colombia sede Manizales*.
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A. y Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, Vol. 8, No. 2, p.19.
- Martínez, R., Ruiz, D., Andrade, M., Blacutt, L., Pabón, D., Jaimes, E., León, G., Villacís, M., Quintana, J., Montealegre, E., Euscátegui, C. (2013). Sistemas del Clima de los Andes Tropicales. En: *Cambio climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales*. Herzog, S., Martínez, R., Jorgense, H., Tiessen, H. (2013). *Inter-American Institute for Global Change Research and Scientific Committee on Problems of the Environment*, 117-130.
- Mehta, V., Rosenberg, N. y Mendoza, K., (2012). Simulated impacts of three decadal climate variability phenomena on dryland corn and wheat yields in the Missouri River Basin. *Agricultural and Forest Meteorology*. 152 (2012) 109-124.
- Mesa, Ó. J., Poveda, G., Vélez, J. I., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Mantilla, R., Barco, O. J., Cuartas L. A., Botero, B. y Montoya, M. I. (2000). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. XIV Seminario de Hidráulica e Hidrología, 7-9 de septiembre, Villa de Leyva, Boyacá.
- Meyer, D., Harmon, C. (1984). Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Science Society of America Journal*. 48(5):1152-1157.
- Michiels, P. y Gabriels, D. (1996). Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in

- the Mediterranean region. JL Rubio, A. Calvo (eds.), Soil degradation and desertification in Mediterranean environments, Geofoma Ediciones, Logrono, Espana, 49-70.
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2014). Indicadores Cadenas – Plátano. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Platano/Documentos/004%20%20Documentos%20Competitividad%20Cadena/D.C.%202014%20Octubre%20-%20Indicadores%20platano.pdf>
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2017). Perfil económico: Departamento de Caldas.
- Mirzabaev, A. (2013). Impacts of weather variability and climate change on agricultural revenues in central Asia. *Quarterly Journal of International Agriculture* 52 (2013), 3:237-252.
- Monsalve Sáenz, G. (2004). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Montealegre J. y J. Pabon. (2000). La Variabilidad Climática Interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña—Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorol. Colomb.* 2:7-21. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Montealegre, E. y J. Pabón. (2002). Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. Universidad Nacional: *Revista Meteorológica Colombiana*. Vol. 5, p. 59-65. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Montealegre, E. (2005). Escalas de variabilidad Climática. Instituto de Hidrología Meteorología y Medio Ambiente. IDEAM. Bogotá.
- Montealegre, E. (2009). Estudio de la Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Nota Técnica IDEAM, IDEAM -METEO/022-2009, Bogotá D.C.
- Murugan, M., Mukund, V., Ramesh, R., Hiremath, M. B., Josephraj Kumar, A. y Shetty, P. K. (2008). Centennial rainfall variation in semi arid and tropical humid environments in the cardamom hill slopes, southern Western Ghats, India. *Caspian J. Environ. Sci*, 6(1), 31-39.
- Naranjo Sarmiento, L. A. (2016). Influencia de la Oscilación del Sur - El Niño y La Niña sobre la temperatura y la velocidad del viento en la subcuenca de los ríos Blancos y del sector Cordón del Plata - Argentina. Universidad Internacional de Andalucía.
- The National Drought Mitigation Center – NDMC. (2017). University of Nebraska-Lincoln. Recuperado de <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2016). National Weather Service. Climate Prediction Center. Recuperado de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2017). National Weather Service. Climate Prediction Center. Recuperado de http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2017a). National Weather Service. Climate Prediction Center. Recuperado de http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2017b). National Weather Service. Recuperado de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2017c). National Weather Service. Recuperado de http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_disc_apr2017/ensodisc.shtml
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2017d). National Weather Service. Recuperado de <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2017e). National Weather Service. Recuperado de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml>
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2017f). National Weather Service. Recuperado de <https://stateoftheocean.osmc.noaa.gov/sur/atl/tsa.php>
- National Center for Atmospheric Research – NCAR. (2017). TNI (Trans-Niño Index) and N3.4 (Niño 3.4 Index). Recuperado de http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/TNI_N34/
- North Carolina Climate Office - NCCO. (2017). Pacific/North American Pattern. Recuperado de <http://climate.ncsu.edu/edu/PNA>

- Nunes, M. A., Bierhuizen, J. F. y Ploegman, C. (1968). Studies on the productivity of coffee. I. Effect of light, temperature, and CO₂ concentration on photosynthesis of *Coffea arabica*. *Acta Botanica Neerlandica* 17, 93–102.
- Ocampo, O. L. (2011). El cambio climático y su impacto en el Agro. *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes. Vol 33. 115-123
- Ocampo, O. L. (2012). Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Ocampo, O. L. (2013). Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Ocampo, O. L. (2017). Modelación hidrológica y agronómica de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la producción cafetera de Caldas. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Ocampo, O., Vélez, J. y Londoño, A. (2014). Análisis de vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Chinchiná. Universidad Nacional de Colombia.
- Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *The Professional Geographer*, 32(3), 300–309.
- Oliveira, V. A. D., Mello, C. R. D., Durães, M. F. y Silva, A. M. D. (2014). Soil erosion vulnerability in the Verde river basin, southern Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(3), 262-269.
- Onstad, C. A. y Foster, G. R. (1975). Erosion modeling on a watershed. *Transactions of the ASAE*, 18(2), 288-0292.
- Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2004). Servicios de Información y Predicción del Clima (SIPC) y Aplicaciones Agrometeorológicas para los Países Andinos. Actas de la Reunión Técnica llevada a cabo en Guayaquil, Ecuador, del 8 al 12 de diciembre de 2003. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2005). Tiempo, Clima, Agua y Desarrollo Sostenible. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2008). Guía de Prácticas hidrológicas. OMM. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2011). El Clima y Tú. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2011). Resumen de conclusiones y cifras actualizadas sobre el cambio climático. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2012). El tiempo, el clima, el agua: Motores de nuestro futuro. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2012b). Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial – OMM (2013a). Resumen de conclusiones y cifras actualizadas sobre el cambio climático. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2013). El estado del clima mundial 2001-2010. Un decenio de fenómenos climáticos extremos. Ginebra, Suiza.
- Pabón, J. y Rivera. (1993). Análisis de la variabilidad interanual de los caudales de los ríos Magdalena y Cauca. *Atmósfera*, Vol. 20, p. 1-11.
- Pabón, J. D., Zea, J., León, G., Montealegre, J., Hurtado, G. y González, O. (1998). La Atmósfera, El Tiempo y El Clima. En: *El Medio Ambiente en Colombia*. Bogotá: IDEAM. p. 35-91.
- Pabón, J. D., Eslava, J. A., Pelkowski, J., Montoya, G. J., Vega, E. E. (2001). Resultados de la simulación del clima por CCM3. *Meteorología Colombiana*. 4, 61-64.
- Pabón, J. D. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 0(12), 111 - 119. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/10277/10796>
- Pabón J. D. (2011). El cambio climático en la región de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia – Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá D.C., 128 páginas.
- Patiño, D. A., Ocampo, O. L. y Vélez, J. J. (2014). Efectos de la oscilación del sur en el régimen hidrológico de la cuenca del río Chinchiná, Colombia.

- Paulet, I. M. (1973). Guía para el planeamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvias del Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina, Departamento de Recursos de Agua y Suelos. Publicación NO.3. 1973.
- Pederos, M. (2013). Manchas en el sol: ¿lluvias en la tierra?. Publicaciones del Departamento de Física, Universidad de Tarapacá. Volumen 17.
- Penland, C. y Matrosova, L. (1998). Prediction of tropical Atlantic sea surface temperatures using Linear Inverse Modeling. *Journal of Climate*, 11:483-496.
- Porter, J. R. y Semenov, M. S. (2005). Crop responses to climatic variation. *Philos. Trans. Roy. Soc. B* 360, 2021–2035.
- Poveda, G. (1994). Cuantificación de los efectos de El Niño y La Niña sobre los caudales mensuales de los ríos colombianos. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología. IAHS, Santiago, Chile.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia. Una síntesis desde la escala Interdecadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Ciencia* Vol. 28, No. 107, p. 201-222.
- Poveda, G. y Mesa, O. J. (1993). Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Atmósfera*, 17, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá.
- Poveda, G. y Mesa, O.J. (1996). Las fases extremas del ENSO - El Niño y La Niña - y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, XI, México, 21-37.
- Poveda, G., Gil, M. y Quiceno, N. (1998). El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. *Bulletin Institute Francaise d'Études Andines* 27 (3): 721-731.
- Poveda G. y Mesa, O. J. (1999). La corriente de Chorro Superficial del Oeste ("del Chocó) y otras dos corrientes de Chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* Vol. 23, No. 89, p. 517-528. ISSN 0370-3908.
- Poveda, G. y Jaramillo, A. (2000). ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia. *Biospheric Aspects of the Hydrologic Cycle*. 8:3-6, IGBP, Diciembre.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M., Quiceno, N. y Mantilla, R. (2001). Seasonality in ENSO Related Precipitation, River Discharges, Soil Moisture, and Vegetation Index (NDVI) in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8):2169-2178.
- Poveda G, Vélez J. I., Mesa O., Hoyos C. D., Mejía J. F., Barco J. y Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*. No 6. Pp 121-130.
- Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Ramírez, J. M., Ceballos, L. I., Zuluaga, M. D., Arias, P. A., Botero, B. A., Montoya, M. I., Giraldo, J. D. y Quevedo, D. I. (2007). Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12 (1), 1-4.
- Poveda, G., Álvarez, D. y Rueda, O. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36 (11-12).
- Poveda, G., Turbay, S., Vélez, J. J., Ocampo, O. L., Acevedo, E. y Bedoya, M. (2014). ¡ No sé qué vamos a hacer con estos climas!. Vulnerabilidad y adaptación a las variaciones climáticas extremas en la cuenca de la quebrada Los Cuervos, afluente del río Chinchiná, Colombia. Medellín: Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia, IDRC, CIHT.
- Prentice, I. C., Heimann, M. y Sitch, S. (2000). The carbon balance of the terrestrial biosphere: ecosystem models and atmospheric observations. *Ecol. Applic.* 10, 1553–1573.
- Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2000). Panorama del Impacto ambiental de los recientes desastres naturales en América Latina y el Caribe.
- Puertas, O. y Carvajal, Y. (2008). Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, Vol. 23, p. 104-118.
- Ramírez, O. A. F. (2006). Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas. Trabajo de grado Ingeniero Forestal. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima. Ibagué. 98 p

- Ramírez, O. E. A., Hincapié, G. E., Sadeghian, Kh. S. y Pérez, G. U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé* 58(1):40-52.2007.
- Ramírez, B., V. H. y Jaramillo, R. A. (2009). Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia, en la región andina central de Colombia. *Cenicafé* 60(2): 161-172.
- Ramírez, B. V. H., Arcila P. J., Jaramillo, R. A., Rendón, S. F. R., Cuesta, G. G., Menza, F. H. D., Mejía, M. C. G., Montoya, D. F., Mejía, M. J. W., Torres, N. J. C., Sánchez, A. P. M., Baute, B. J. E. y Peña, Q. A. J. (2010a). Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar: *Cenicafé* 61(2):132-158.2010
- Ramírez, B. V. H., Jaramillo, R. A. y Arcila, P. J. (2010). Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafé* 61(1):55-66.2010
- Ramírez, B. V. H. y Jaramillo, A. (2012). Relación entre índices de El Niño/La Niña (ENSO) y el brillo solar en la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé* 63 (2): 90-97. 2012
- Ramírez, B. V. H., Arcila P. J., Jaramillo, R. A., Rendón, S. F. R., Cuesta, G. G., García, J. C., Menza, F. H. D., Mejía, M. C. G., Montoya, D. F., Mejía, M. J. W., Torres, N. J. C., Sánchez, A. P. M. y Baute, B. J. E. (2013). Variabilidad climática y la floración del café en Colombia.
- Ramírez, J. y Jarvis, A. (2010). Disaggregation of Global Circulation Model Outputs. Disaggregation of Global Circulation Model Outputs. Disponible en: <http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. y Yoder, D. C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 703, 404 pp.
- Restrepo, L. y Gonzales, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, Vol. 20, No. 2, p. 183-192.
- Ritchie, T. J. (1991). Specifications for the ideal model for predicting crop yields. In: Muchow, R.S.; Bellamy, J.A. (Eds.). *Climate risk in crop production: models and management for semiarid tropics and subtropics*. Wallingford, CAB, 1991. p. 97-122.
- Rivera, P. J. H. (1990). Determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la zona Cafetera Central Colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Rivera, J. H. y Gómez, A. A. (1991). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé*, 42(2), 37–52.
- Rosenzweig, C., Strzepek, K. M., Major, D. C., Iglesias, A., Yates, D. N., McCluskey, A. y Hillel, D. (2004). Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. *Global Environ. Change* 14, 345–360.
- Roy, S. y Rouault, M. (2013). Spatial patterns of seasonal scale trends in extreme hourly precipitation in South Africa. *Applied Geography* 39 (2013) 151-157.
- Rueda, V. O. y Mendez Perez, J. M. (2002). Sobre la variabilidad y el cambio climático en Chiapas. In: Pohlan, J. (Ed.), *México y La Cafecultura Chiapaneca*. Shaker Verlag, Aachen, Germany.
- Ruiz C., A. D. C., y Pabón Caicedo, J. D. (2013). Efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña en la precipitación y su impacto en la producción agrícola del departamento del Atlántico (Colombia). *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, 22(2).
- Saavedra, J. (2001). Planificación Ambiental de los Recursos Forestales en la Región de la Araucanía, Chile. Definición de las Unidades Homogéneas de Gestión. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 342 p.
- Salazar, A. (1990). Ciclicidad de los caudales en Colombia, fases húmedas y secas. *Atmósfera*, 14, pp. 42-53.
- Salinas-Zavala, C. A., Douglas, A. V. y Diaz, H. F. (2002). Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sens. Environ.* 82 (2–3), 417–430.
- Seneviratne, S. I., Lüthi, D., Litschi, M. y Schär, C. (2006). Land–atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443, 205–209.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. (2014). El Fenómeno El Niño en el Perú. Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – PLANAGERD 2014-2021 (Objetivo Nacional y Objetivo Estratégico 1).

- Shamshad, A., Azhari, M. N., Isa, M. A., Hussin, W. W. y Parida, B. P. (2008). Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI 30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. *Catena*, 72(3), 423-432.
- Slingo, J. M., Challinor, A. J., Hoskins, B. J. y Wheeler, T. R. (2005). Introduction: food crops in a changing climate. *Philos. Trans. Roy. Soc. B* 360, 1983–1989.
- Smith, C. A. y Sardeshmukh, P. (2000). The Effect of ENSO on the Intraseasonal Variance of Surface Temperature in Winter., *International J. of Climatology*, 20 1543-1557.
- Stover, R. H. (1979). "Pseudostem growth, leaf production and flower initiation in the Grand Nain banana". In: *Tropical Agriculture Research Services, La Lima (Honduras). Bulletin, No. 8. p. 37.*
- Summerfield, M. A. (1991). *Global Geomorphology*. Editorial Longman Scientific and Technical; Inglaterra.
- Sweennen, R. (1984). A physiological study of the suckering behavior in plantain (*Musa cv. AAB*). *Dissertationes de Agricultura. Tesis para optar al título de Doctor. Leuven: Katholieke universiteit te leuven.*
- Tafur, E. y Obando, F. (2010). Erosividad de las lluvias en la región centro-sur del departamento de Caldas, Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 62(1), 5307-5318
- Torres, R. E. (2006). *Agrometeorología*. México, D. F. Ed. Trillas, 156 p.
- Trenberth, K. E. y Hurrell, J. W. (1994). Decadal Atmosphere-Ocean Variations in the Pacific. *Climate Dynamics: Vol. 9*, pp.303-319.
- Trenberth, K. E. y Stepaniak, D. P. (2001). Indices of el Niño evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697-1701.
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., et al. (2007). Observations: surface and atmospheric climate change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, et al. (Eds.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Trenberth, K. E. y National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2016). *The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)*. Recuperado de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.
- Turbay, S., Nates Cruz, B., Jaramillo, F. L., Vélez, J. J. y Ocampo, O. L. (2014). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 0(85), 95–112. <http://doi.org/10.14350/rig.42298>
- Universitat de Barcelona - UB. (2017). Recuperado de http://www.ub.edu/aplica_infor/spss/cap5-6.htm
- University of Washington – UW. (2017). *The Pacific Decadal Oscillation (PDO)*. Recuperado de <http://research.jisao.washington.edu/pdo/>
- Valli, M., Sree, K. S. y Krishna, I. V. M. (2013). Analysis of precipitation concentration index and rainfall prediction in various agro-climatic zones of Andhra Pradesh, India. *Int Res J Environ Sci*, 2(5), 53-61.
- Velasco Hernández, M., Morales Acoltzi, T., Estrella Chulim, N. G., Díaz Ramos, R., Juárez Sánchez, J. P., Hernández Vázquez, M., et al. (2015). Tendencias y variabilidad de índices de cambio climático: enfoque agrícola en dos regiones de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol. 6, No. 7*, p. 1587-1599.
- Velásquez, A. y Rosales, C. (2002). *Los pasos del Niño en Colombia 1980-2001*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Vélez, J., Orozco, M., Duque, N. y Aristizábal, B. (2015). Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos. *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Facultad de Administración*.
- Verdin, J., Funk, C., Senay, G. y Choularton, R. (2005). Climate science and famine early warning. *Philos. Trans. Roy. Soc. B* 360, 2155–2168.
- Viramontes, O., Escoboza, L., Pinedo, C., Pinedo, A., Reyes, V., Román, J. y Pérez, A. (2007). Morfometría de la cuenca del río San Pedro. *Conchos, Chihuahua: Tecnociencia Chihuahua*, 1(3), 21-31.

- Wall, G. J., Coote, D. R., Pringle, E. A. y Shelton, I. J. (2002). *Rusle-Can/Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada*. Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Wallace, J. M y Gutzler, D.S. (1981). Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review* 109:784-811
- Wang, C. (2004). ENSO, Atlantic climate variability, and the Walker and Hadley circulations. In *The Hadley circulation: Present, past and future* (pp. 173-202). Springer Netherlands.
- Wang, C. y Enfield, D. B. (2001). The tropical Western Hemisphere warm pool, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1635-1638
- Wang, C. y Enfield, D. B. (2003). A Further Study of the Tropical Western Hemisphere Warm Pool. *J. Climate*, 16, 1476–1493, <https://doi.org/10.1175/1520-0442-16.10.1476>
- Waylen, P. y Poveda, G. (2002). El Niño-Southern Oscillation and aspects of Western South America hydro-climatology. *Hydrological Processes*, 16:1247-1260.
- Webster, A. L. (2000). *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. (McGraw-Hill, Ed.).
- Williams, J. R. (1975). Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor, en: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. ARS-S-40. USDA, Washington DC.
- Willett, K. M., Jones, P. D., Gillett, N. P. y Thorne, P. W. (2008). Recent changes in surface humidity: development of the HadCRUH dataset. *Journal of Climate*, 21, 5364-5383.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(2), 285-291.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning.
- Wolter, K. (1987). The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, (26):540 – 558, 1987. 1.2
- Wolter, K. y Timlin, M. S. (1998). Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank?. *Weather*, 53: 315–324. doi:10.1002/j.1477-8696.1998.tb06408.x
- Yoo, M. J., Won, Y., Jeong, M., Kim, K., Shin, D., Lee, Y. y Cho, Y. (2013). Intensity of climate variability derived from the satellite and MERRA reanalysis temperatures: AO, ENSO, and QBO. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- Zhang, X., Zwiers, F. y Peterson, T. (2008). La adaptación imperativa: ¿está preparada la ciencia climática?. *Boletín de la OMM* 57. 103-108.
- Zhao, Y., Lourdes, V. T., Wang, C. y Wang, S. (2005). Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the humid and sub-humid tropics.