Las series de brillo solar promedio anual interdecadal son homocedásticas (prueba Levene), en cada una de las estaciones evaluadas. Con el análisis de varianza, ANOVA, se obtienen diferencias estadísticas entre las décadas -con una significancia del 95% (α<0,05)- en Agronomía, Cenicafe y Granja Lúker; para Santágueda, se encuentran diferencias estadísticas, con una significancia del 94% (α<0,06). La prueba post hoc de Duncan revela diferencias estadísticas significativas (α<0,05) en las tres últimas décadas para todas las estaciones.

El análisis de varianza de las series tri-decadales de brillo solar anual promedio (series homocedáticas) indica diferencias estadísticas significativas (α<0,05), para las estaciones de Agronomía, Cenicafe y Granja Lúker; no hay diferencias estadísticas significativas en la estación Santágueda. Aplicando prueba post-hoc de Duncan se confirman las diferencias en el promedio de brillo solar anual del período más reciente 1981-2010, frente al registrado en 1951-1980 en la estación Cenicafé; de igual manera hay diferencias con el período 1961-1990 para las estaciones Agronomía y Cenicafé; sin embargo, no se obtienen diferencias estadísticas significativas con el registro 1971-2000, en ninguna de las estaciones evaluadas.

Tomando como base períodos de tres décadas, se calculan los cambios del brillo solar anual promedio del período actual, 1981-2010 en comparación con los períodos históricos, los resultados se consolidan en la Tabla 6.1. El resumen de anomalías en el brillo solar se presenta en la Tabla 6.2, fueron calculadas frente al período histórico inmediatamente anterior. Se evidencia reducción en el brillo solar anual promedio; el cual, expresado en términos de Brillo Solar Máximo (BSM) alcanza el 6,7% en la cuenca medio alta y 3,9% en la cuenca media, donde se presentan las mayores anomalías.

Tabla 6.1: Anomalías en el brillo solar anual promedio 1981-2010

Estación	Reducción Brillo Solar anual promedio % 1981-2000 frente registros históricos			Reducción equivalente en términos % BSM		
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1951-1980	1961-1990	1971-2000
Agronomía	-18,9* (1956-1980)	-11,6*	-2,5	-7,6 (1956-1980)	-4,3	-0,9
Cenicafé	-11,2*	-7,9*	-2,4	-4,8	-3,2	-0,9
Granja Lúker	ND	ND	-2,6	ND	ND	-1,2
Santágueda	ND	ND	-1,0	ND	ND	-0,5

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

Tabla 6.2: Anomalías promedio en el brillo solar anual

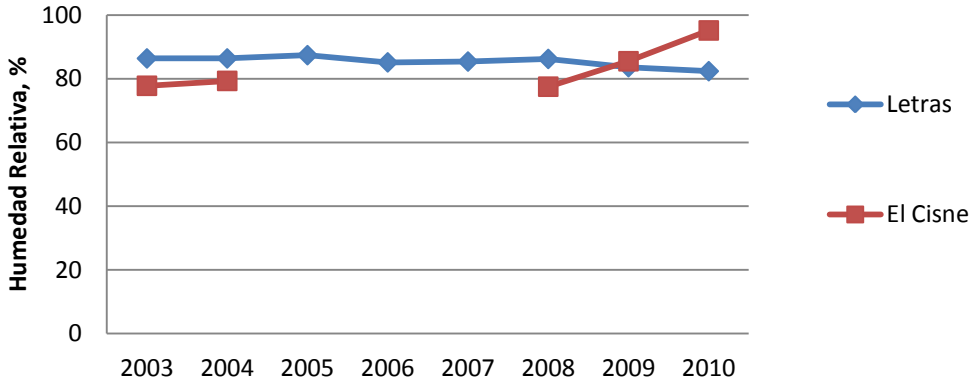
Estación	Reducción Brillo Solar anual promedio %			Reducción, equivalente en términos %BSM		
	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1961-1990	1971-2000	1981-2010
Agronomía	-8,2*	-9,3*	-2,5	-3,3	-3,4	-0,9
Cenicafé	-3,7	-5,6*	-2,4	-1,6	-2,3	-0,9
Granja Lúker	ND	ND	-2,6	ND	ND	-1,2
Santágueda	ND	ND	-1,0	ND	ND	-0,5

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

6.2 Humedad Relativa

Las estaciones ubicadas en la cuenca alta, El Cisne y Letras, registran humedades relativas promedio diarias altas, como se observa en la Figura 6.3. Para la estación de páramo, durante el año 2010, se alcanzaron valores promedio superiores al 95% en todos los meses del año, con excepción de enero y febrero. En Letras, la humedad relativa promedio diaria es alta y relativamente constante durante todo el año. Sin embargo, los registros son cortos para estimar alguna tendencia.

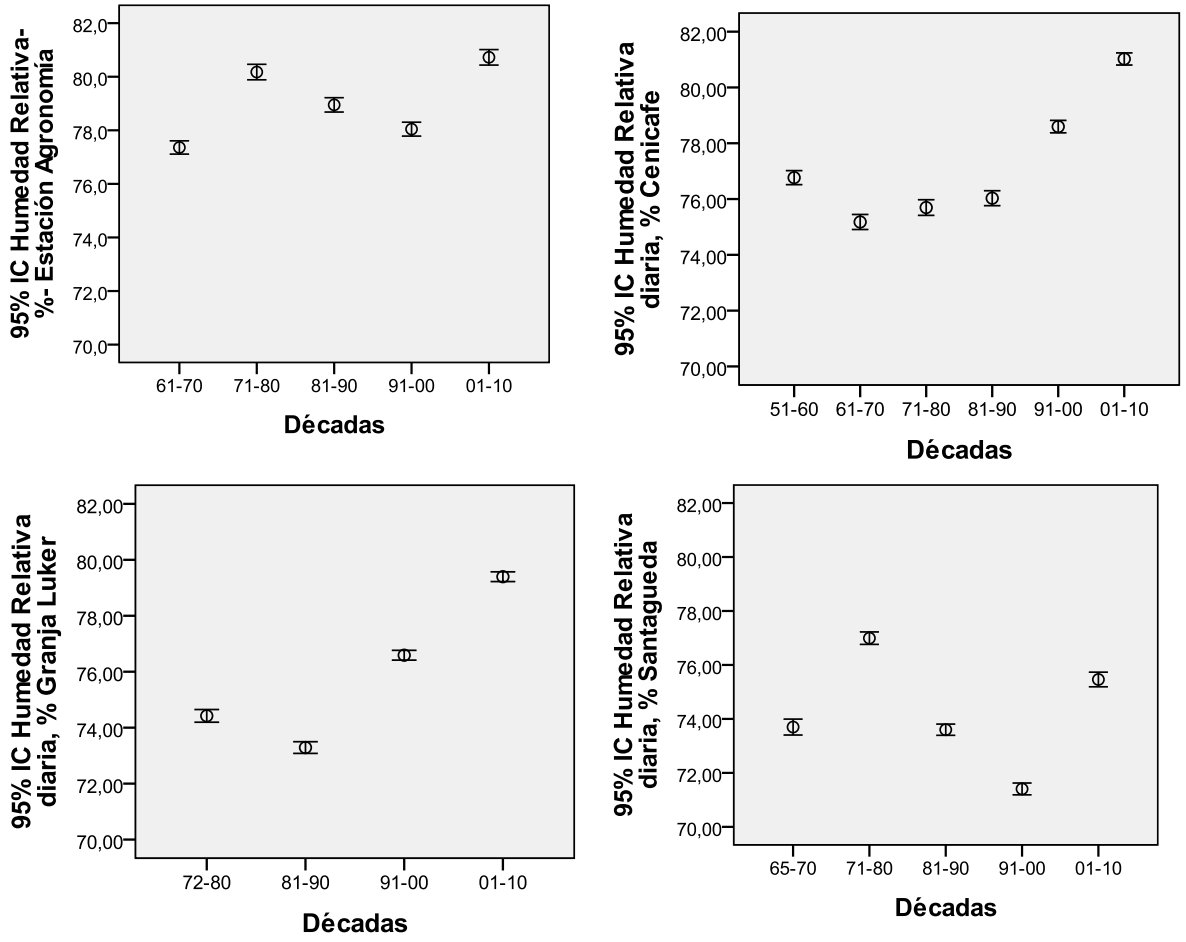
Figura 6.3: Comportamiento de la humedad relativa media estaciones El Cisne y Letras



En las estaciones de la cuenca media-alta a baja, las series diarias de humedad relativa no se ajustan a distribución Normal (K.S. sig<0,05); los coeficientes de variación son bajos y oscilan entre el 8 al 12%. El análisis Interdecadal de la humedad relativa promedio se presenta en la Figura 6.4; se observa aumento en las últimas décadas, en especial en las estaciones de la cuenca media. Aplicando el test no paramétrico de Kruskal Wallis se encuentran diferencias estadísticas significativas (α<0,05). La prueba U de Mann Whitney indica que hay diferencias significativas (α<0,05) entre la humedad relativa de la última década, 2001-2010 y las anteriores.

La distribución de la humedad relativa diaria promedio tridecadal se observa en la Figura 6.5; el comportamiento es bimodal con mayores valores en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. No se aprecian diferencias sustanciales entre los períodos en las estaciones Agronomía y Santágueda. Sin embargo, si se analizan las series a escala diaria, la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis arroja diferencias significativas (α<0,05) en por lo menos dos de los períodos en las estaciones Agronomía, Cenicafé y Santágueda; el test de Mann-Whitney indica iguales resultados en la estación Granja Lúker. Aplicando este último test se encuentran diferencias en la humedad relativa diaria del período más reciente-1981-2010- con los anteriores, para las estaciones Cenicafé y Granja Lúker; mientras que en Agronomía se tienen diferencias significativas de la humedad relativa del período actual (1981-2010) frente a 1961-1990, pero no con 1971-2000.

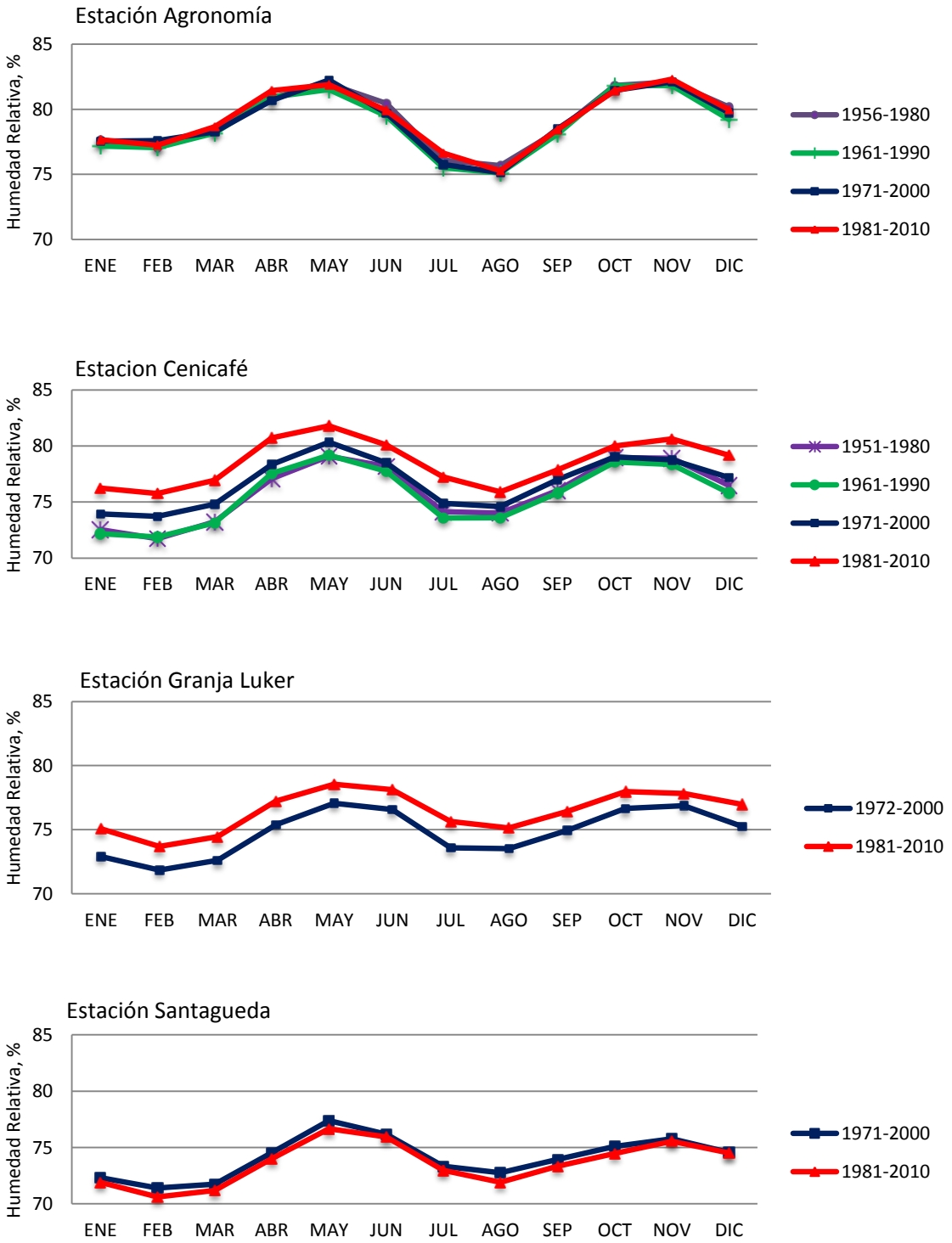
Figura 6.4: Humedad relativa promedio interdecadal



Las series de humedad relativa promedio anual se ajustan a distribución normal (S.W. sig>0,05) y son homocedásticas (e. Levene). El análisis de varianza indica que hay diferencias estadísticas significativas (α<0,05) en al menos dos de los periodos interdecadales para todas las estaciones. La prueba post-hoc de Duncan refleja que hay diferencias (α<0,05) en la humedad relativa promedio anual de la década más reciente (2001-2010) con los promedios de las décadas anteriores en las estaciones Cenicafé y Granja Lúker.

Para los períodos tridecadales, el análisis de varianza y la prueba post hoc de Duncan muestran que no hay diferencias estadísticas significativas (α<0,05) entre los períodos en la estación Agronomía. Para la estación Cenicafé se encuentran diferencias estadísticas significativas (α<0,05) entre la humedad relativa del período actual 1981-2010, con respecto a los anteriores. La prueba t-student lleva a iguales resultados para la estación Granja Lúker. Sin embargo, no se obtienen diferencias estadísticas significativas en la estación Santágueda.

Figura 6.5: Distribución de humedad relativa promedio tridecadal



Tomando como base el promedio multianual por períodos de 30 años, se calculan las anomalías de la humedad relativa del período actual, 1981-2010 en comparación con los históricos, los resultados se resumen en la Tabla 6.3. La anomalía media se presenta en la Tabla 6.4; se calcula a partir del promedio de las anomalías para cada uno de los períodos tri-decadales, con respecto al período inmediatamente anterior; se evidencia por tanto un incremento promedio de la humedad relativa en 1,5% por década (unidades de Humedad relativa) en las estaciones de la cuenca media.

Tabla 6.3: Cambios en la humedad relativa

Estación	Anomalía en % humedad relativa 1981-2000 frente registros históricos		
	1951-1980	1961-1990	1971-2000
Agronomía	ND	0,4	0,2
Cenicafé	2,7*	2,9*	1,8*
Granja Lúker	ND	ND	1,6*
Santágueda	ND	-1,5	-0,5

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

Tabla 6.4: Anomalías en el humedad relativa promedio

Estación	Anomalía promedio %HR	Anomalía %HR	
		1971-2000	1981-2000
Cenicafé	1,5	1,1*	1,8*
Granja Lúker	1,6	ND	1,6*

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

6.3 Radiación solar

La estación el Cisne sólo se dispone de registros de radiación solar desde el año 2003; sin embargo, los registros son incompletos, por lo cual sólo pueden analizarse algunos años, como se observa en la Figura 6.6. El promedio multianual es de 2,7 kW-h/m^2; los valores máximos mensuales promedio son 5,2 kW-h/m^2 y mínimos 1,41 kW-h/m^2. En la estación Letras, la radiación solar promedio calculada para el período 2003-2010, es 3,86 kW-h/m^2 (Figura 6.5) Los registros son muy cortos para estimar alguna tendencia.

Para las estaciones Agronomía, Cenicafé, Granja Lúker y Santágueda, se realizó el cálculo de los promedios multianuales de la radiación solar estimada; los valores promedio tomando periodos de tres décadas, se presentan en la Figura 6.7. Estas series calculadas se distribuyen normalmente (S.W. sig>0,05). El análisis de varianza indica que hay diferencias significativas (α = 0,05) en el último período 1981-2010 frente al anterior (1971-2010) sólo en la estación Granja Lúker. Sin embargo, se encuentran diferencias significativas (α = 0,05) con los períodos históricos en las estaciones Agronomía y Cenicafé.

Figura 6.6: Radiación solar promedio kW-h/m^2 estaciones cuenca alta

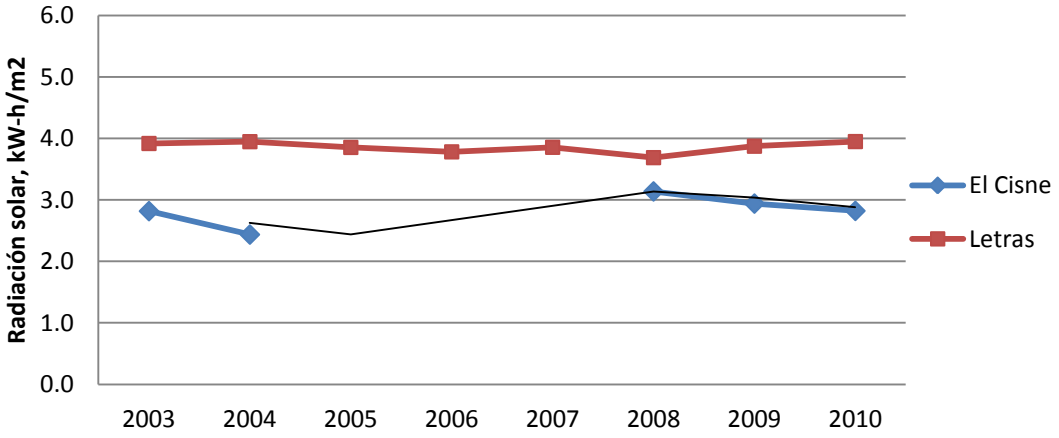
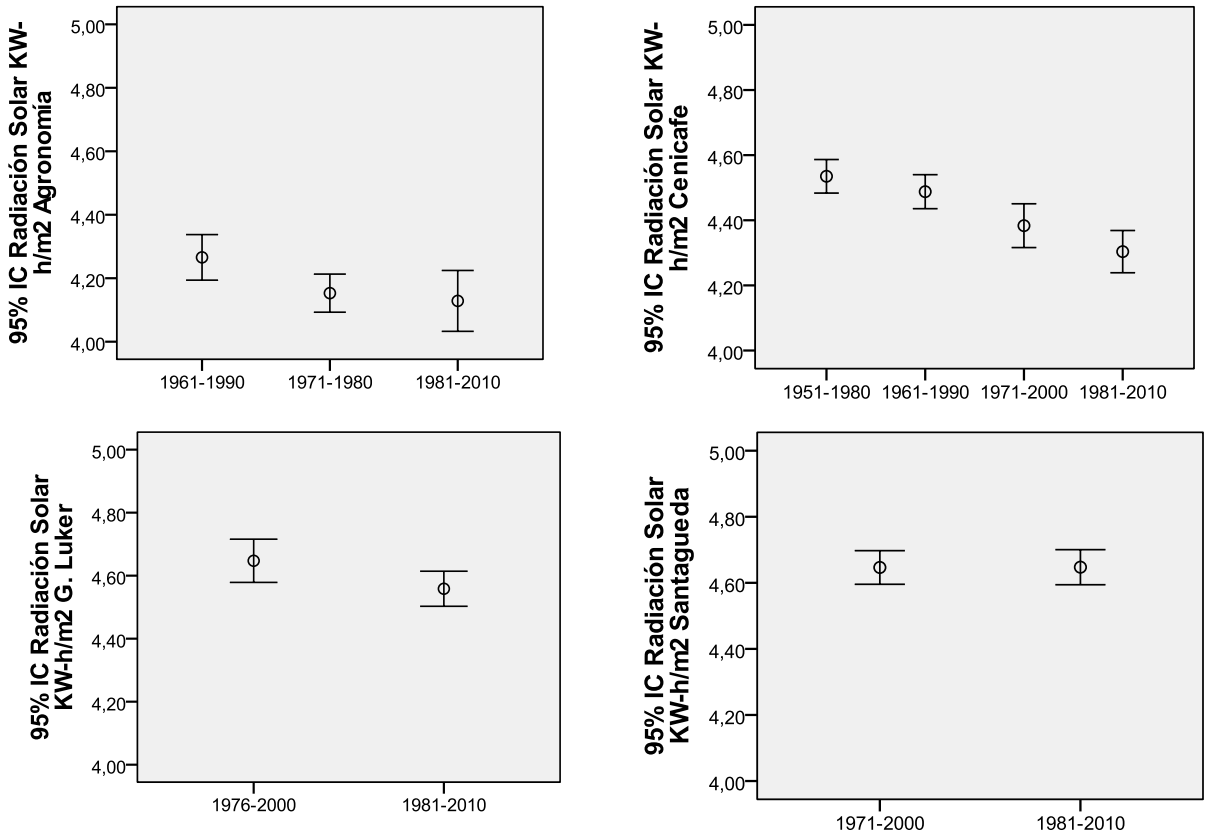


Figura 6.7: Promedio de la radiación solar estimada tridecadal



Para las series de radiación solar estimadas con base en los registros de brillo solar y humedad relativa, se calculan las anomalías del período actual, 1981-2010 en comparación con los históricos, los resultados se resumen en la Tabla 6.5. El error de estimación es 0,17 Kw-h/m^2, por tanto, sólo se tienen diferencias con el período 1951-1980.

Tabla 6.5: Cambios en la radiación solar estimada

Estación	Reducción Radiación solar anual promedio Kw-h/m^2 1981-2000 frente registros históricos		
	1951-1980	**1961-1990**	**1971-2000**
Agronomía	-0,24*	-0,15	-0,03
Cenicafé	-0,25*	-0,19	-0,08
Granja Lúker	ND	ND	-0,09
Santágueda	ND	ND	0,00

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

6.4 Temperaturas

6.4.1 Temperatura media

- **Estación El Cisne:** localizada a una altitud de 4830 m.s.n.m., dispone de registros de temperatura desde el año 2003; el comportamiento de las temperaturas medias y extremas se presenta en la Figura 6.8; se observa aumento en todas las temperaturas; sin embargo, los registros son incompletos y cortos lo cual no permite establecer una tendencia de aumento confiable. La temperatura promedio para el tiempo de registro es 0,4°C; sin embargo, la distribución de frecuencias tiene fuerte asimetría negativa, por lo cual la mediana es más representativa del valor central, alcanzado valores de 1,2°C.

- **Estación Nereidas:** ubicada a una altura de 4470 m.s.n.m., cuenta con registros de temperatura desde el año 2004; pero, son incompletos y sólo se tiene información de algunos períodos, como se observa en la Figura 6.8. La temperatura promedio para el período de registro es de 2°C.

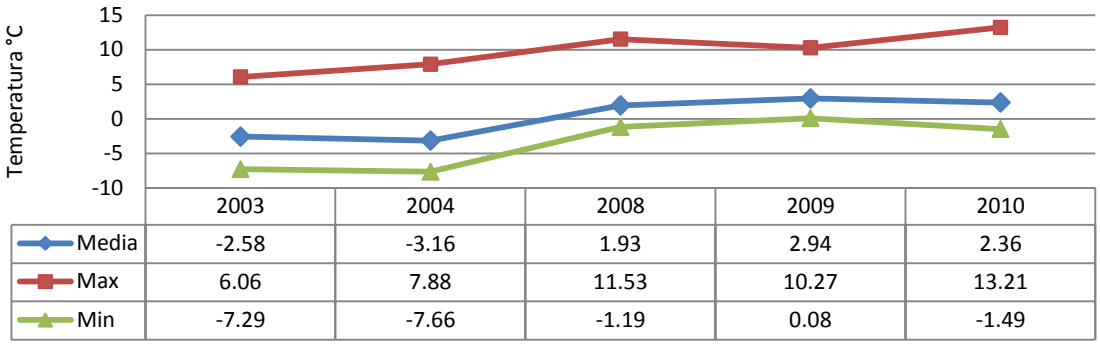
- **Estación Los Molinos:** se encuentra a una altitud de 4260 m.s.n.m., tiene registros de temperatura desde el año 2003; sin embargo, la serie está incompleta y sólo pueden analizarse algunos años como se muestra en la Figura 6.8. Para el tiempo de registro, la temperatura media es 2,8°C.

- **Estación río Claro:** ubicada a una altitud de 4183 m.s.n.m. Con registros de temperatura desde el año 2003. A escala anual, el comportamiento de las temperaturas media y extremas

se presenta en la Figura 6.9. Durante el período evaluado se observa aumento de las temperaturas medias y mínimas, sin embargo el registro es muy corto y está incompleto para estimar tendencias. La temperatura promedio es de 4,2°C.

Figura 6.8: Comportamiento de las temperaturas en las estaciones de páramo

Estación El Cisne

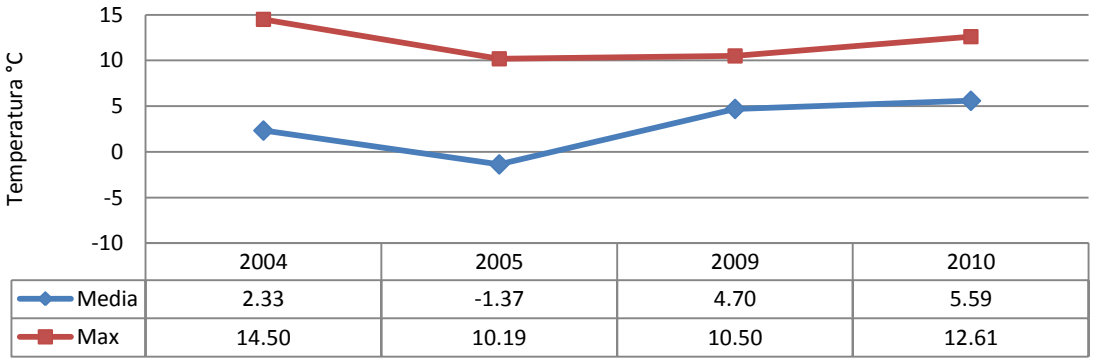


	2003	2004	2008	2009	2010
Media	-2.58	-3.16	1.93	2.94	2.36
Max	6.06	7.88	11.53	10.27	13.21
Min	-7.29	-7.66	-1.19	0.08	-1.49

Estación Nereidas

	2004	2005	2009	2010
Media	2.36	2.86	1.00	1.81
Max	13.69	14.22	12.61	13.22
Min	-3.92	-4.69	-6.25	-5.56

Estación Molinos



	2004	2005	2009	2010
Media	2.33	-1.37	4.70	5.59
Max	14.50	10.19	10.50	12.61

- **Estación Las Brisas:** está localizada a una altitud de 4150 m.s.n.m. El comportamiento de la temperatura en esta estación, reportado hasta el 2006, se observa en la Figura 6.9; la temperatura promedio es de 4,7°C. Se observa incremento en todas las temperaturas. La tendencias de aumento reportados por IDEAM (2010) son de 1,17°C/década en las temperaturas máximas, 0,29°C/década en las temperaturas medias y 0,24°C/década en las temperaturas mínimas. Sin embargo, las anomalías se reportan por períodos tri-decadales y no se dispone de registros suficientes para esta estimación.

- **Estación Letras:** cuenta con mediciones de temperatura desde el año 2003. El promedio de las temperaturas media, máxima y mínima se representa en la Figura 6.9. Para la temperatura media, se tiene un comportamiento monótono alrededor del promedio, 7,1°C; el coeficiente de variación es relativamente bajo con valores del 12%. El promedio multianual de la temperatura máxima es 10,8°C, con un coeficiente de variación del 13,5%. Para la temperatura mínima, el promedio es 4,3°C; el coeficiente de variación alcanzan valores del 24%. Los valores extremos reportados en el tiempo de registro oscilan entre 18,4°C y 0°C.

Las series diarias de temperatura de las estaciones ubicadas en la cuenca media-alta a baja- Agronomía (1956-2010), Cenicafé (1950-2010), Granja Lúker (1972-2010) y Santágueda (1965-2010) - no se distribuyen normalmente (K.S sig<0,05). Los coeficientes de variación son bajos y fluctúan entre el 5 al 7%. La temperatura promedio diaria por períodos interdecadales se muestra en la Figura 6.10, se observa incremento en el transcurso del tiempo. Aplicando la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis se obtienen diferencias estadísticas significativas (α = 0,05) en todas las estaciones.

La distribución de la temperatura promedio por períodos de tres décadas se presenta en la Figura 6.11, se observa incremento de la temperatura entre los períodos, aunque los cambios son menores en las estaciones de la cuenca baja. La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis revela diferencias estadísticas significativas (α = 0,05) en todas las estaciones

Las series de temperatura media promedio anual, para todas las estaciones, se distribuyen normalmente (S.W- sig>0,05). El análisis de varianza y la prueba post hoc de Ducan para los períodos interdecadales, indica que hay diferencias significativas (α = 0,05), en especial en la última década (2001-2010). Para las series tridecadales, se obtienen diferencias estadísticas significativas (α = 0,05), para el período más reciente (1981-2010); los resultados se resumen en la Tabla 6.6 y la Tabla 6.7. En esta última tabla se presentan las anomalías medias, calculadas con base en el período inmediatamente anterior, en promedio ascienden a 0,18°C por período década. Para el período 1981-2010, las anomalías, tomando como base los registros históricos, se resumen en la Tabla 6.8; el incremento de la temperatura con respecto al período 1951-1980, ha alcanzado 0,5°C.

Figura 6.9: Comportamiento de las temperaturas estaciones cuenca alta

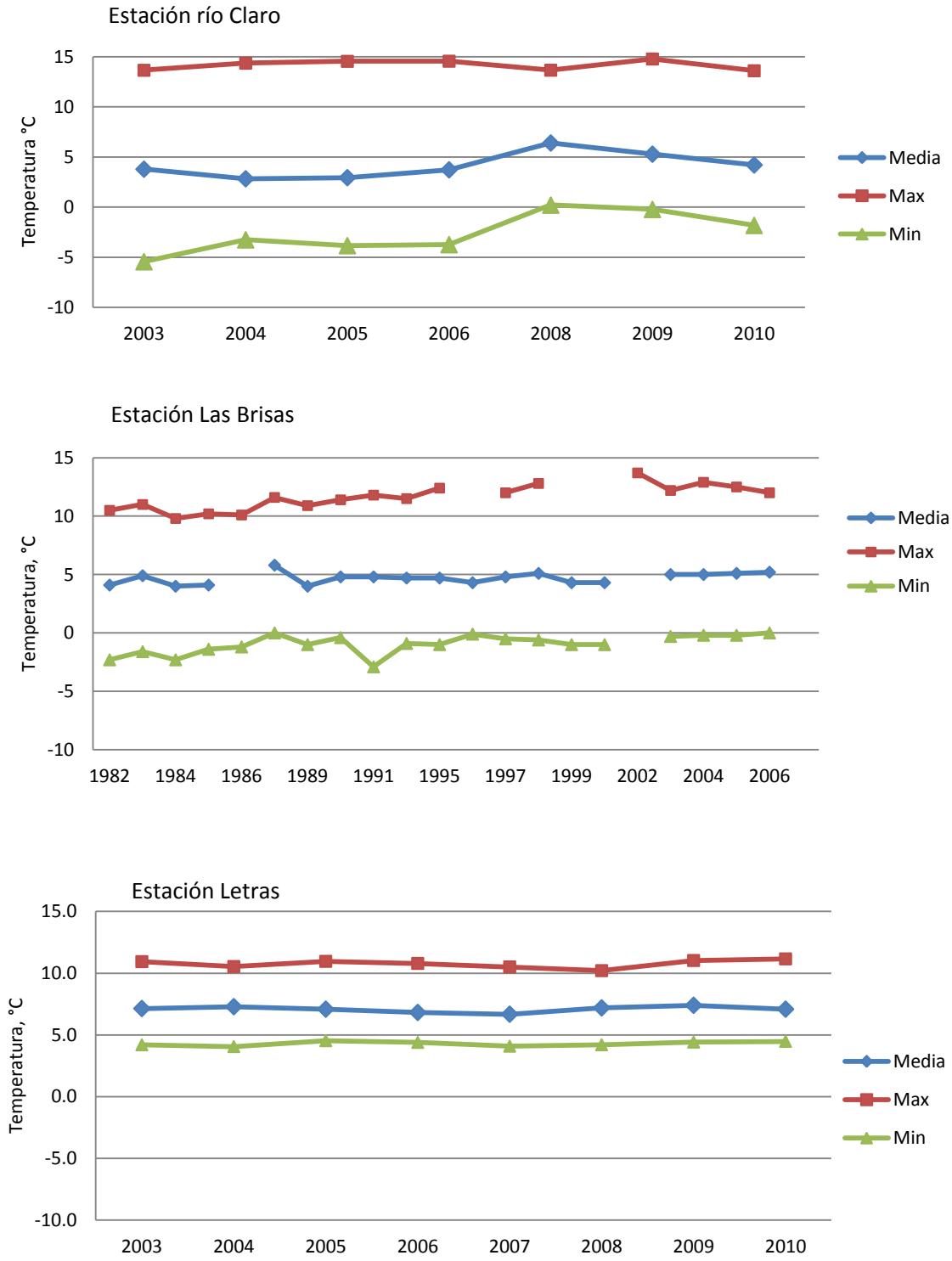


Figura 6.10: Temperatura media diaria promedio interdecadal

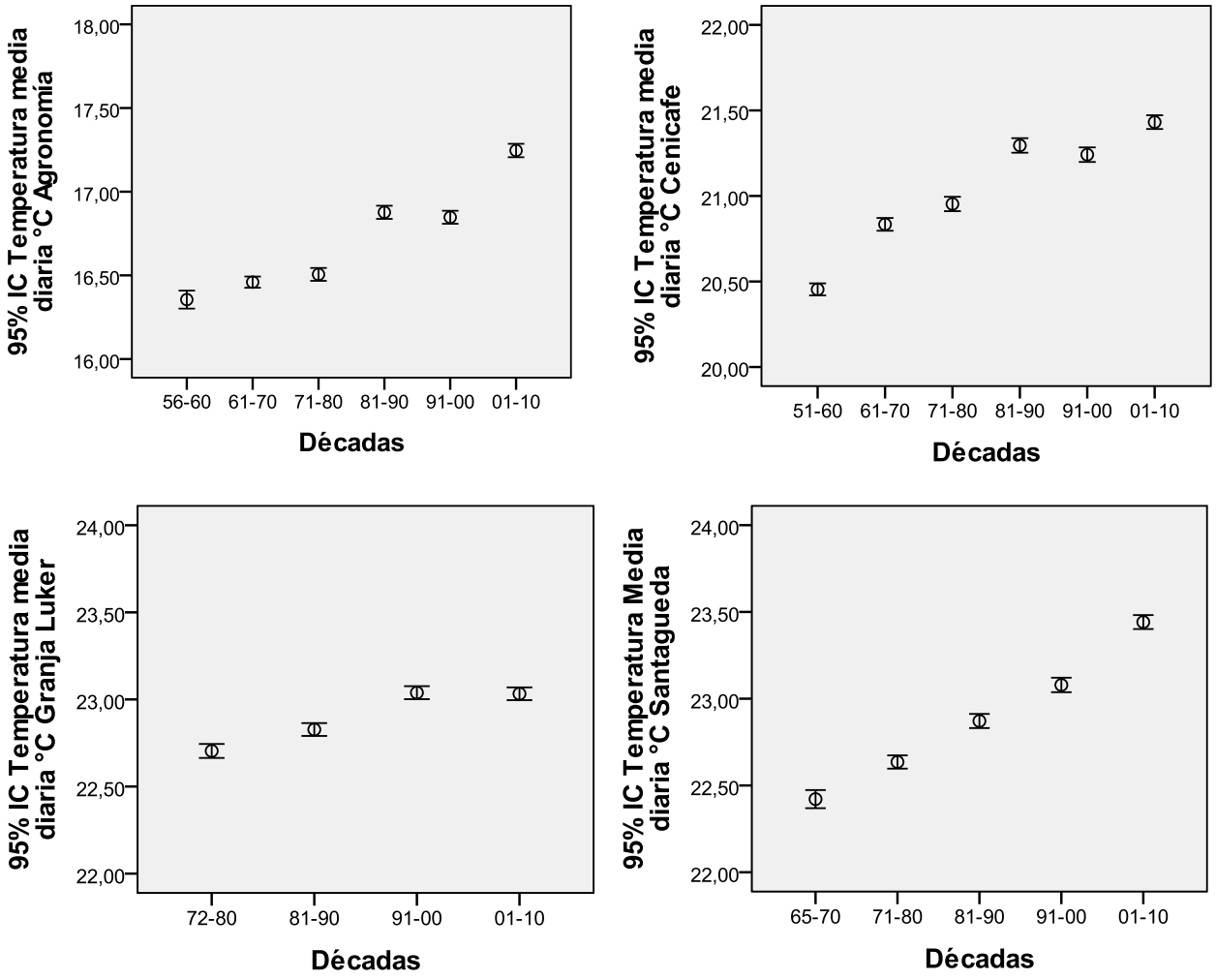


Tabla 6.6: Temperatura media anual por década

Estación	Temperatura media por década, °C					
	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
Agronomía	16,35	16,45	16,50	16,85	16,88	17,24
Cenicafé	20,45	20,83	20,95	21,24	21,29	21,43
Granja Lúker	ND	ND	22,70	22,83	23,03	23,04
Santágueda	ND	22,43	22,63	22,87	23,08	23,42

Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos (α = 0,05).

Figura 6.11: Distribución de temperatura media análisis tridecadal

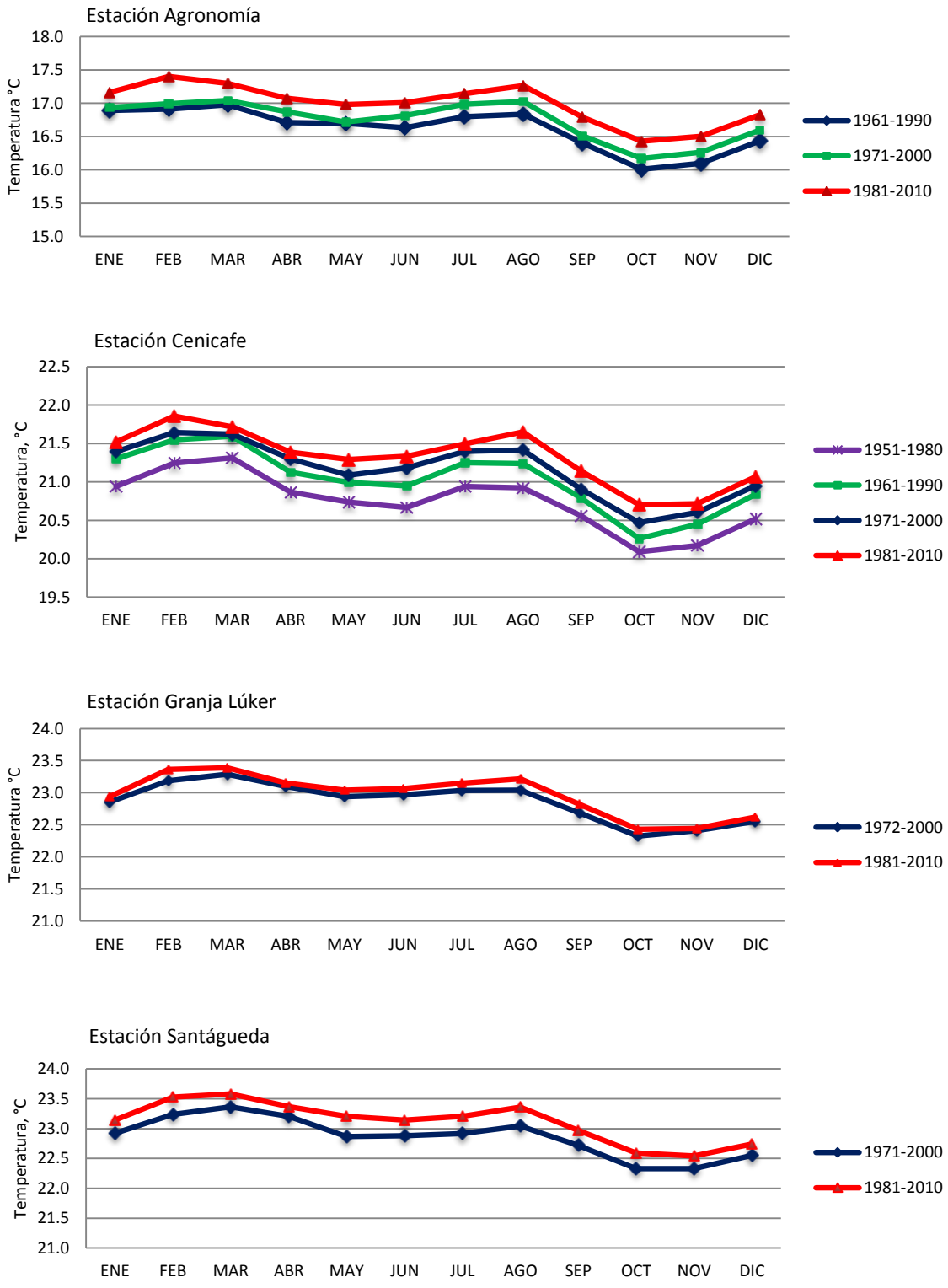


Tabla 6.7: Temperatura media anual tridecadal

Estación	Temperatura media tridecadal °C				Anomalía°C
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	Promedio
Agronomía	16,45	16,61	16,74	16,99	0,18
Cenicafé	20,74	21,02	21,16	21,32	0,19
Granja Lúker	ND	ND	22,86	22,97	0,11
Santágueda	ND	22,68	22,86	23,12	0,22

Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos (α = 0,05).

Tabla 6.8: Anomalía en la temperatura media 1981-2010

Estación	Anomalía Temperatura media con respecto al registro histórico, °C		
	1951-1980	1961-1990	1971-2000
Agronomía	0,54*	0,38*	0,25*
Cenicafé	0,58*	0,30*	0,16*
Granja Lúker	ND	ND	0,11
Santágueda	ND	0,44*	0,26*

6.4.2 Temperaturas máximas

En las estaciones analizadas se disponen de registros de temperaturas máximas diarias. Estas series no se distribuyen normalmente (K.S. sig<0,05). Los coeficientes de variación son bajos entre el 9 al 7%. La distribución se observa en la Figura 6.12 sigue el mismo comportamiento bimodal, con mayores valores en el primer trimestre del año. Se observan diferencias en especial en las estaciones de la cuenca media alta y media. Se realiza el análisis por períodos para detectar si hay cambios significativos en las temperaturas máximas. La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis indica diferencias estadísticas significativas (α = 0,05) en por lo menos dos de los períodos tanto para las series de una como de tres décadas.

Las temperaturas máximas promedio anual en todas las estaciones siguen la distribución normal (S.W- α = 0,05). Las series de las estaciones Cenicafé, Granja Lúker y Santágueda son homocedásticas (Prueba de Levene- α = 0,05) para los períodos de una y tres décadas. El análisis de varianza y la prueba pos-Hoc de Duncan muestra diferencias estadísticas significativas (α = 0,05) en la temperatura promedio máxima de la última década en las estaciones Granja Lúker y Santágueda. Para los períodos tridecadales sólo se encuentran diferencias significativas (α = 0,10) en la estación Cenicafé. En la estación Santágueda no se encuentran diferencias estadísticas significativas. En la estación Agronomía por la heterocedasticidad de las series se aplican pruebas no paramétricas encontrándose que no hay diferencias significativas. Las temperaturas máximas y anomalías del último período frente al anterior, se resumen en la Tabla 6.9.

Figura 6.12: Distribución de temperaturas máximas análisis tridecadal

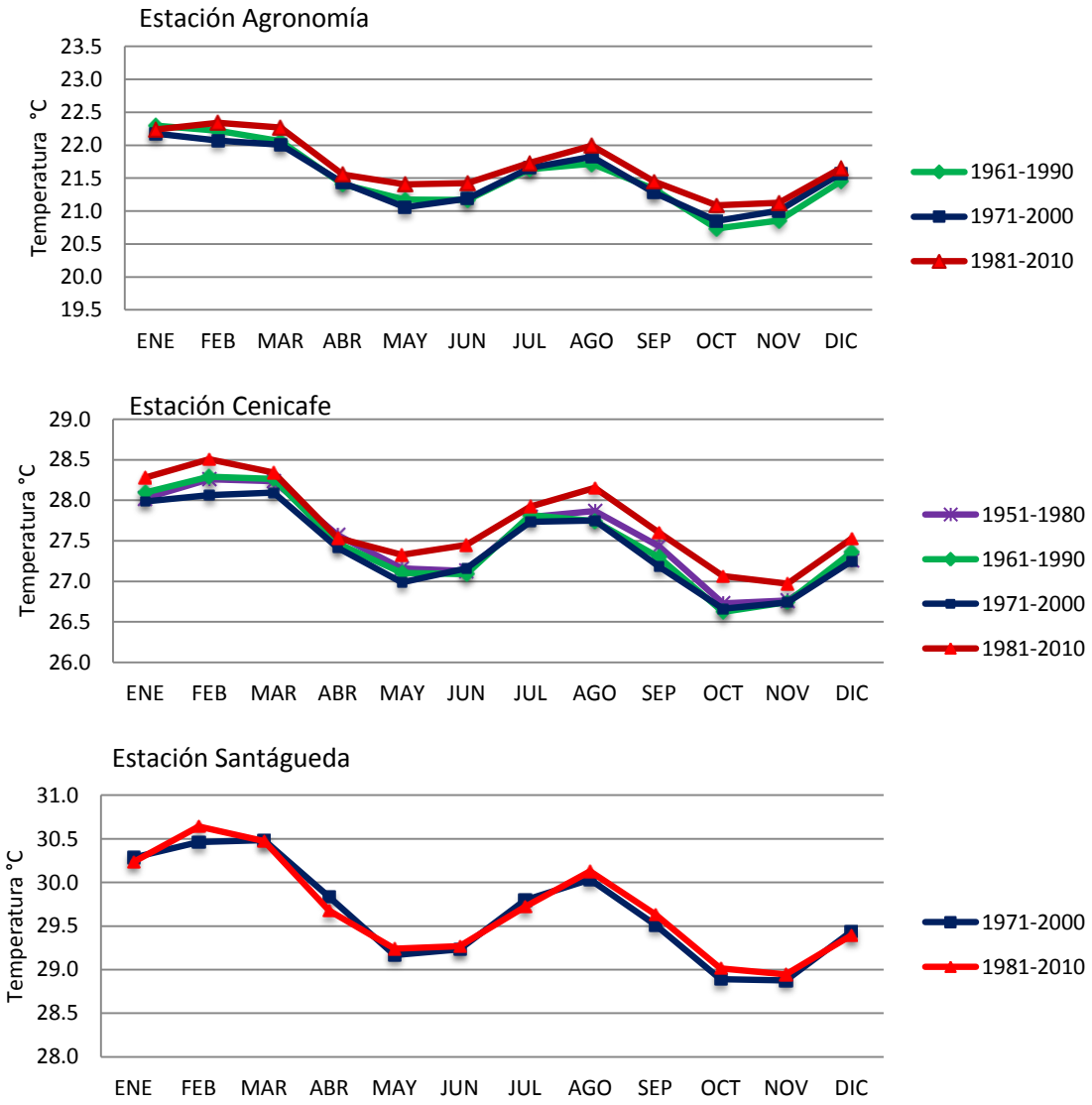


Tabla 6.9: Temperatura máxima promedio anual tridecadal

Estación	Temperatura máxima promedio tridecadal °C				Anomalía 1981-2010°C
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	vs 1971-2000
Agronomía	21,42	21,49	21,50	21,66	0,16
Cenicafé	27,51	27,48	27,41	27,72	0,31*
Granja Lúker			29,23	29,35	0,12
Santágueda			29,57	29,61	0,04

Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos (α = 0,05).

6.4.3 Temperaturas mínimas

La distribución de las temperaturas mínimas promedio por períodos tridecadales se presenta en la Figura 6.13, se observa incremento en las temperaturas mínimas en el transcurso del tiempo y mayores valores en el primer semestre del año.

Las series de temperatura mínima diaria no se ajustan a distribución normal (S.K sig<0,05). El coeficiente de variación es bajo y oscila entre 6-7%. La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis arroja diferencias estadísticas significativas (α = 0,05)- en al menos dos de los períodos-, para las temperaturas mínimas diarias evaluadas tanto por períodos de una como de tres décadas. Las series mensuales se ajustan a distribución normal (K.S.- α = 0,05); sin embargo son heterocedásticas, por tanto, aplicando pruebas no paramétricas se llega a iguales resultados.

La temperatura mínima promedio anual sigue distribución normal en todas las estaciones (S.W.- α = 0,05). Las series son homocedásticas (Levene) tanto por períodos de una como de tres décadas. El Análisis de varianza muestra diferencias estadísticas significativas (α = 0,05) en las temperaturas mínimas entre las diferentes décadas; se obtienen iguales resultados por períodos tridecadales; estos últimos se resumen en la Tabla 6.10, donde se presenta la anomalía promedio en la temperatura mínima, la cual fluctúa entre 0,13 y 0,27°C.

Tabla 6.10: Temperatura mínima promedio anual tridecadal

	Temperatura mínima tridecadal °C				Anomalía°C
Estación	**1951-1980**	**1961-1990**	**1971-2000**	**1981-2010**	**Promedio**
Agronomía	12,94	13,00	13,10	13,37	0,14
Cenicafé	16,45	16,73	16,87	16,92	0,13
Granja Lúker	ND	ND	17,79	18,06	0,27
Santágueda	ND	17,53	17,65	18,01	0,24

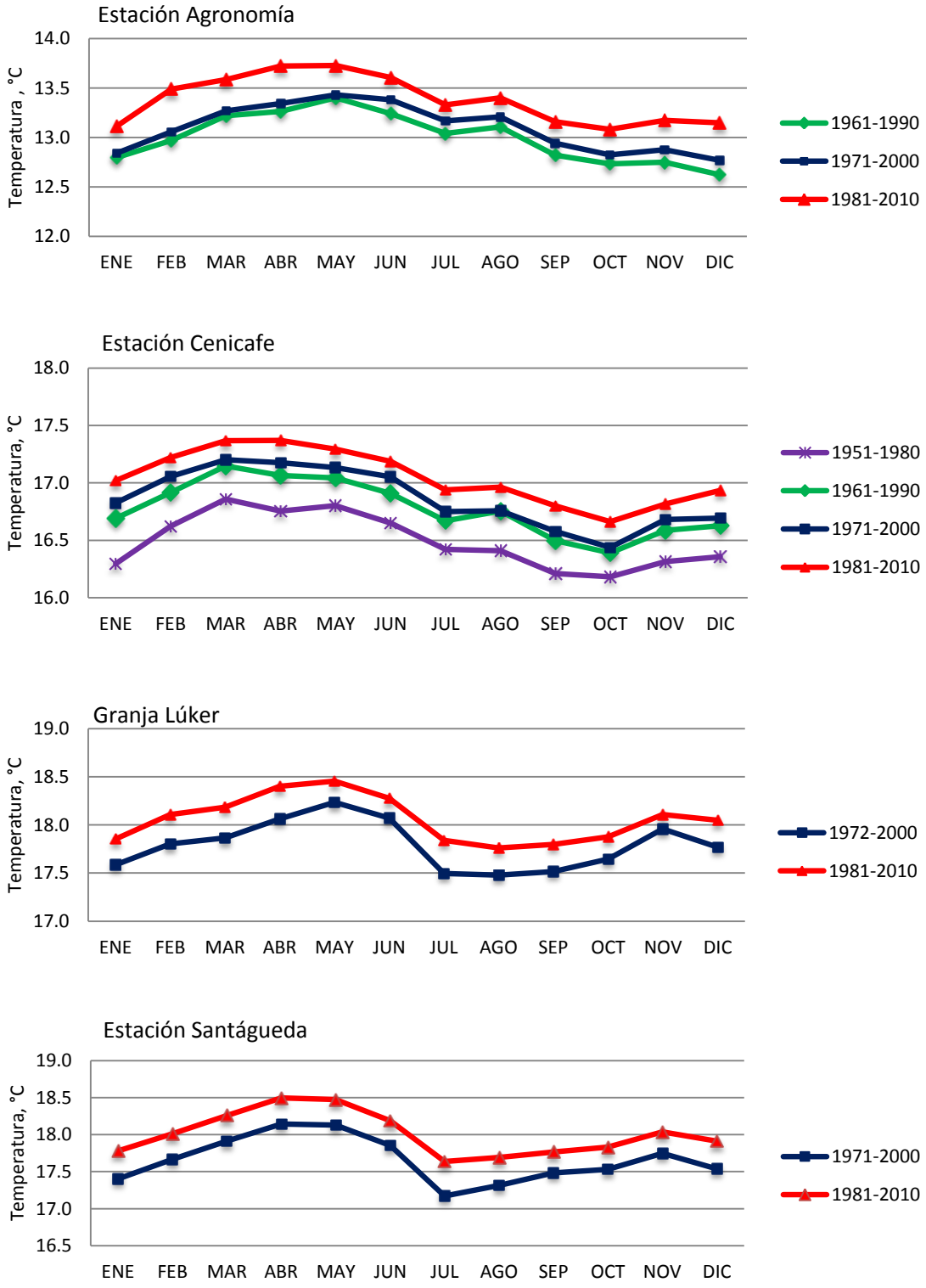
Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos (α = 0,05).

6.5 Precipitación

6.5.1 Precipitación media

Para el estudio se analizaron los registros de precipitación diaria de las estaciones: Brisas (1982-2005), La Esperanza (1975-2008), Papayal (1981-2008), Agronomía (1956-2010), Alta Suiza (1975-2010), Neira (1976-2010), Marmato (1965-2010), Sancancio (1960-2010), Estación La Uribe (1975 – 2010), Java (1981-2010), El Recreo (1970-2010), Naranjal (1956-2010), Montevideo (1960-2010), La Selva (1985-2010), Cenicafé (1942-2010), Granja Lúker (1964-2010), Santágueda (1964-2010) y Arauca (1975-2008).

Figura 6.13: Distribución de temperaturas mínimas promedio tridecadal



El análisis de la distribución de probabilidad de la lluvia diaria tomando como base los períodos de tres décadas sólo indica diferencias en los valores máximos de lluvia (Tabla 6.11). El coeficiente de variación es muy alto y oscila entre 140 y 206%.

Tabla 6.11: Distribución de probabilidad de lluvia diaria

Lluvia diaria mm - Estación Agronomía				
Probabilidad	1956-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010
50,0%	1,0	1,0	0,8	0,9
20,0%	8,1	8,2	8,2	8,3
10,0%	16,2	16,3	16,2	16,6
4,0%	28,6	27,8	27,3	27,3
2,0%	37,7	36,8	36,5	37,1
1,0%	46,9	46,5	46,4	46,6
0,2%	70,1	68,4	65,3	69,2
0,1%	79,9	79,9	73,0	84,0
0,0%	102,3	102,3	102,3	133,9

Lluvia diaria mm - Estación Cenicafe					
Probabilidad	1942-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010
50,0%	1,2	1,2	1,1	1,0	1,1
20,0%	12,1	11,7	11,4	11,7	11,9
10,0%	22,6	22,7	22,5	23,0	23,1
4,0%	35,6	36,6	36,2	37,5	37,8
2,0%	45,5	45,7	45,7	46,8	47,9
1,0%	55,2	54,8	55,1	55,4	57,6
0,2%	75,4	76,3	76,0	77,8	82,3
0,1%	90,3	91,0	93,9	93,9	97,7
0,02%	147,7	147,7	147,7	117,5	117,5

Lluvia diaria mm - Estación Santagueda			
Probabilidad	1964-1990	1971-2000	1981-2010
50,0%	0,6	1,0	0,5
20,0%	9,9	9,7	10,0
10,0%	20,7	20,6	21,2
4,0%	34,2	34,2	35,4
2,0%	43,0	43,4	46,0
1,0%	52,4	54,7	55,8
0,2%	74,7	75,0	75,1
0,1%	80,8	81,9	85,3
0,0%	101,7	94,0	108,7

Sin embargo, realizando el análisis de varianza de las series diarias entre los períodos interdecadales, por pruebas no paramétricas (K.W) se encuentran diferencias estadísticas significativas (α = 0,10) entre los períodos; los resultados de la significancia estadística se resumen en la Tabla 6.12; se omiten los valores, en las estaciones donde no se encontró diferencias significativas. La Tabla 6.13 presenta los resultados del análisis de varianza por prueba no paramétrica de Kruskal Wallis considerando los períodos tridecadales. El cambio en la precipitación se evalúa basado en los medios diarios como aumento en el transcurso del tiempo (+) o disminución (-). En algunos estaciones hay oscilación y por tanto no se evidencia cambio (=).

Tabla 6.12: Significancia estadística análisis de varianza precipitación interdecadal

Estación	Diaria		Mensual		Anual	
	Kruskal Wallis sig	Cambio Lluvia	Kruskal Wallis sig	Cambio LLuvia	Anova sig	Cambio LLuvia
Las Brisas	0,032	-				
La Esperanza	0,000	-	0,065	-		
Papayal	0,000	=				
Agronomía	0,001	+				
Alta Suiza	0,000	+	0,001	+	0,001	+
Neira	0,000	+			0,077	+
Marmato	0,000	+	0,072	-		
Sancancio	0,000	+	0,027	+	0,100	+
La Uribe						
Java	0,000	+	0,026	+	0,058	+
El Recreo	0,000	+	0,003	+	0,057	+
Naranjal	0,002	+	0,025	+	0,008	+
Montevideo	0,000	-	0,004	-	0,005	-
La Selva	0,000	+				
Cenicafé	0,000	+				
Granja Lúker	0,000	+				
Santágueda	0,000	+	0,092	+		
Arauca	0,000	+				

Las series de lluvia mensual no se distribuyen normalmente (S.K) empleando pruebas no paramétricas (K. W), se encuentran diferencias significativas (α=0,10) para algunas estaciones cuyos resultados se resumen en la Tabla 6.12 para los períodos interdecadales y en la Tabla 6.13 para los tridecadales. El cambio en la lluvia en el transcurso del tiempo se denota como aumento (+) o disminución (-) tomando como base los valores medios de lluvia mensual, se omiten los valores donde no se encontró diferencia significativa.

El análisis de varianza tomando como factores no sólo el período si no también el mes es realizado; se evalúan los meses más secos y lluviosos aplicado pruebas no paramétricas, el resumen de la significancia obtenida se presenta en la Tabla 6.14, sólo se reportan los valores donde se tienen diferencias estadísticamente significativas (α=0,10). Para el mes de octubre por ejemplo en el 50% de las estaciones se encontró diferencia estadística significativa con incrementos en la lluvia.

Tabla 6.13: Significancia estadística análisis de varianza precipitación tridecadal

Estación	Diaria		Mensual		Anual	
	Kruskal Wallis sig	Cambio lluvia	Kruskal Wallis sig	Cambio LLuvia	Anova sig	Cambio LLuvia
La Esperanza						
Papayal						
Agronomía	0,078	=				
Alta Suiza	0,000	+	0,056	+	0,10	+
Neira	0,000	+				
Marmato	0,000	-				
Sancancio						
La Uribe						
El Recreo						
Naranjal			0,060	+		
Montevideo	0,000	-	0,029	-	0,035	-
Cenicafé						
Granja Lúker	0,002	+				
Santágueda	0,016	+				
Arauca	0,001	+				

Tabla 6.14: Significancia estadística análisis de varianza series de precipitación tridecadal

Estación	Significancia estadística pruebas no paramétricas							
	Enero	Mayo	Jul	Agosto	Sep	Oct	Nov.	Dic
La Esperanza								
Papayal								
Agronomía				0,032		0,060		
Alta Suiza	0,080	0,039	0,001	0,014	0,071	0,005	0,017	0,004
Neira	0,068		0,010			0,100		0,019
Marmato	0,046		0,000					0,004
Sancancio	0,074	0,069				0,043		
La Uribe								
El Recreo								
Naranjal			0,090					
Montevideo		0,008			0,003	0,000	0,094	0,389
Cenicafé						0,056		
Granja Lúker			0,003	0,037				
Santágueda		0,024		0,004		0,027		
Arauca							0,073	0,024

El comportamiento de la precipitación promedio anual tridecadal se presenta Figura 6.14. Las series de precipitación anual se distribuyen normalmente (S.W. sig>0,05) y son homocedásticas (Levene) por períodos tanto de una como de tres décadas.

Figura 6.14: Comportamiento de la precipitación media anual tridecadal

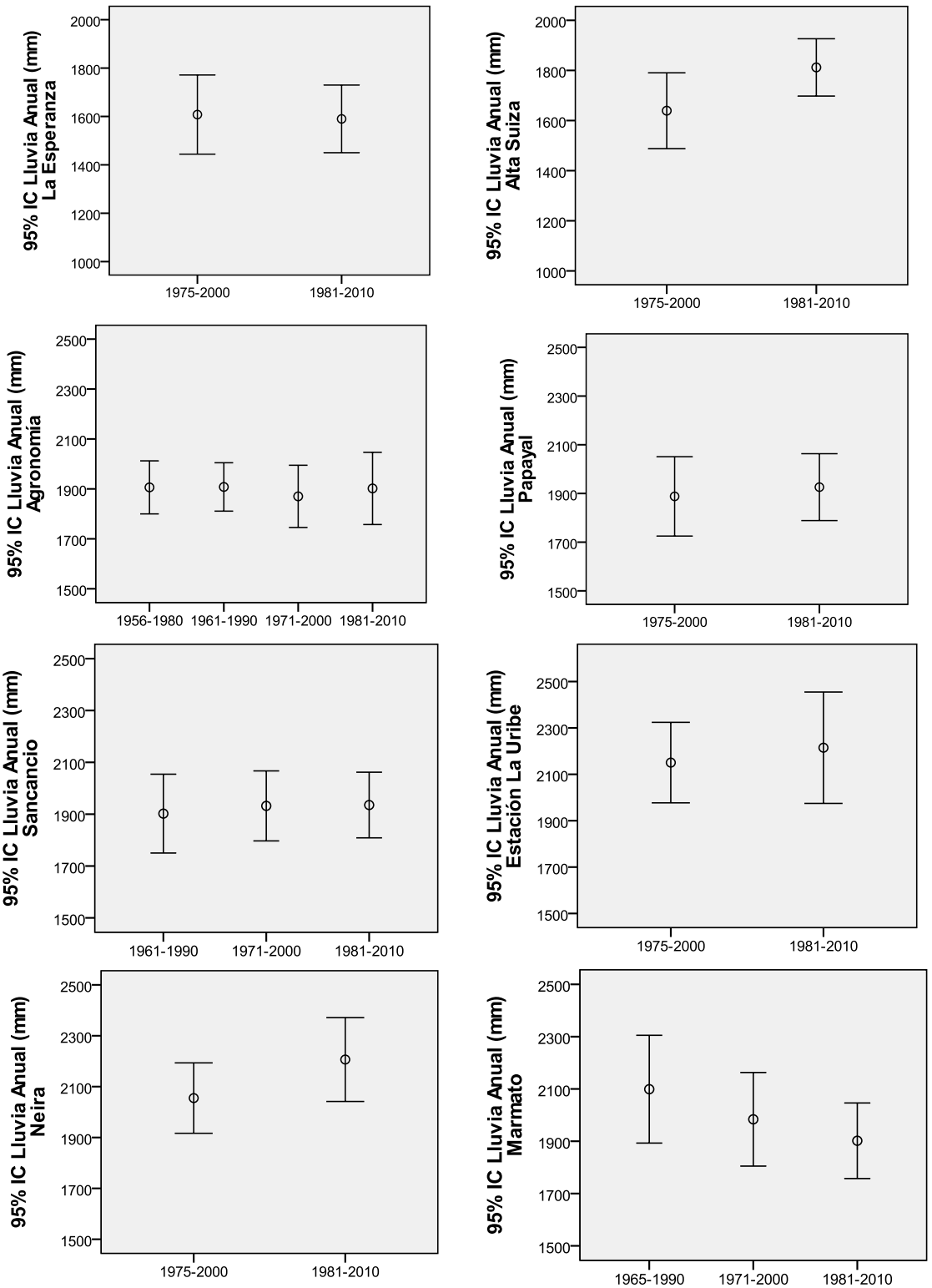
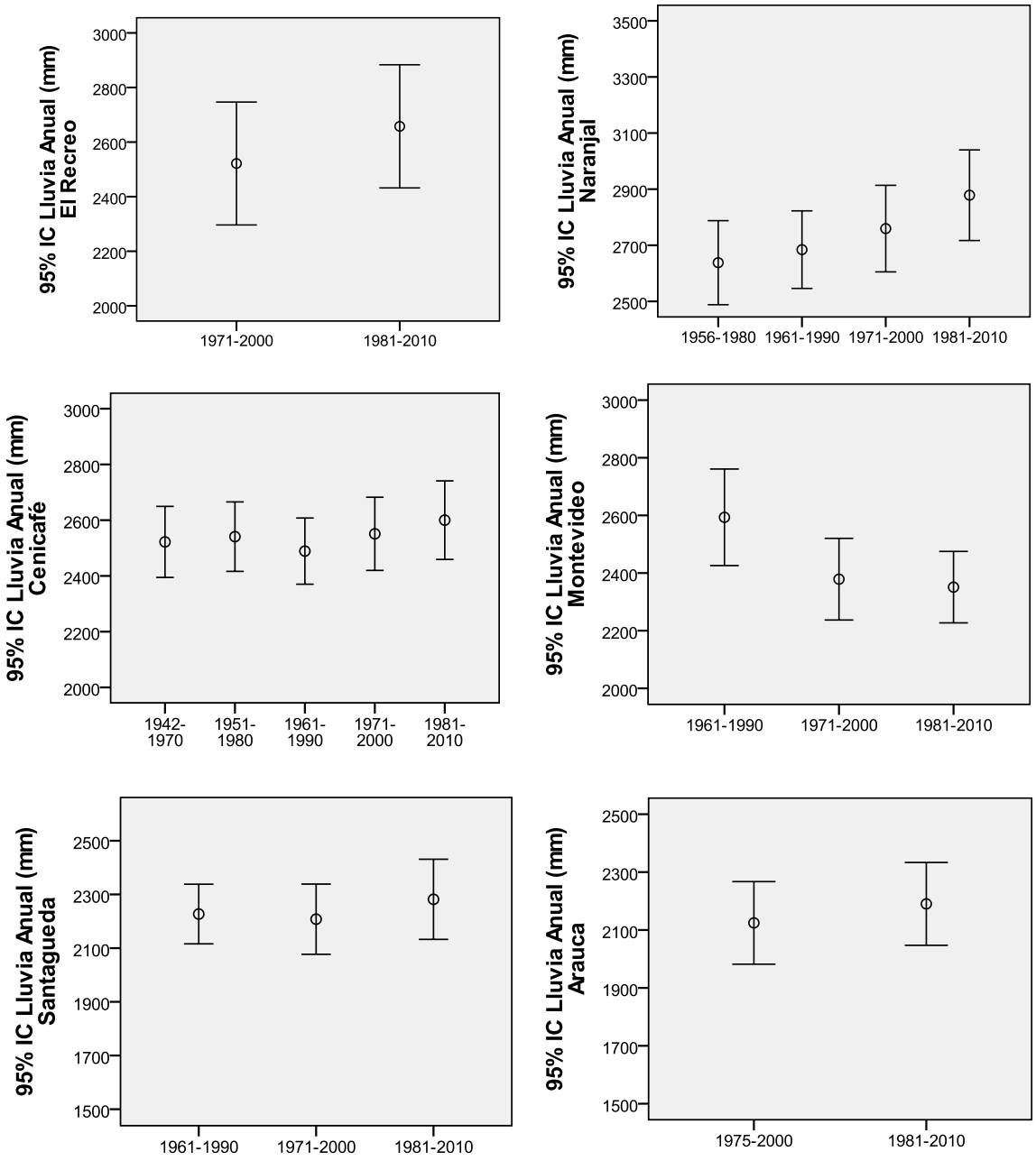


Figura 6.14: Comportamiento de la precipitación media anual tridecadal



El análisis de varianza arroja diferencias significativas (α=0,10) en algunas estaciones; el resumen de la significancia obtenida se presenta en las Tabla 6.12 y Tabla 6.13. En la medida que aumenta la escala de tiempo de la serie, se va reduciendo el número de estaciones donde se encuentran diferencias significativas (α=0,10), por la alta variabilidad de la precipitación.

Tomando como base los períodos tridecadales, se calculan las anomalías en la precipitación promedio anual, las cuales se resumen en Tabla 6.15; la distribución espacial de dichas anomalías se observa en la Figura 6.15. Se tienen reducciones en la precipitación en las estaciones La Esperanza, Marmato y Montevideo; en las demás estaciones aumentos en la precipitación. De acuerdo con el análisis de varianza estas diferencias son estadísticamente significativas (α=0,05) sólo en las estaciones Alta Suiza con incrementos del 8,64% y Montevideo con reducción del 4,72% en promedio.

Figura 6.15: Anomalías en la precipitación anual

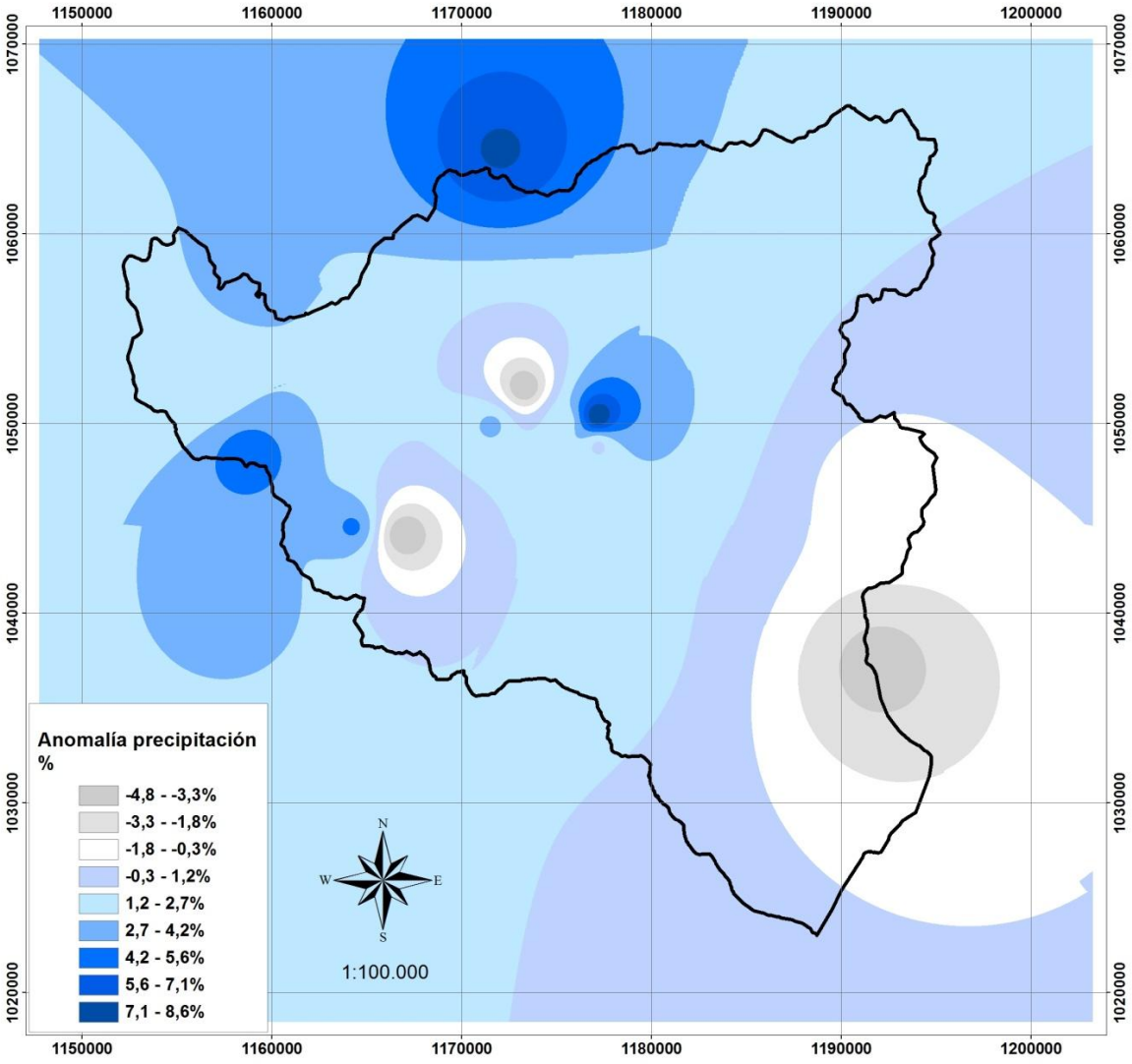


Tabla 6.15: Anomalías en la precipitación anual

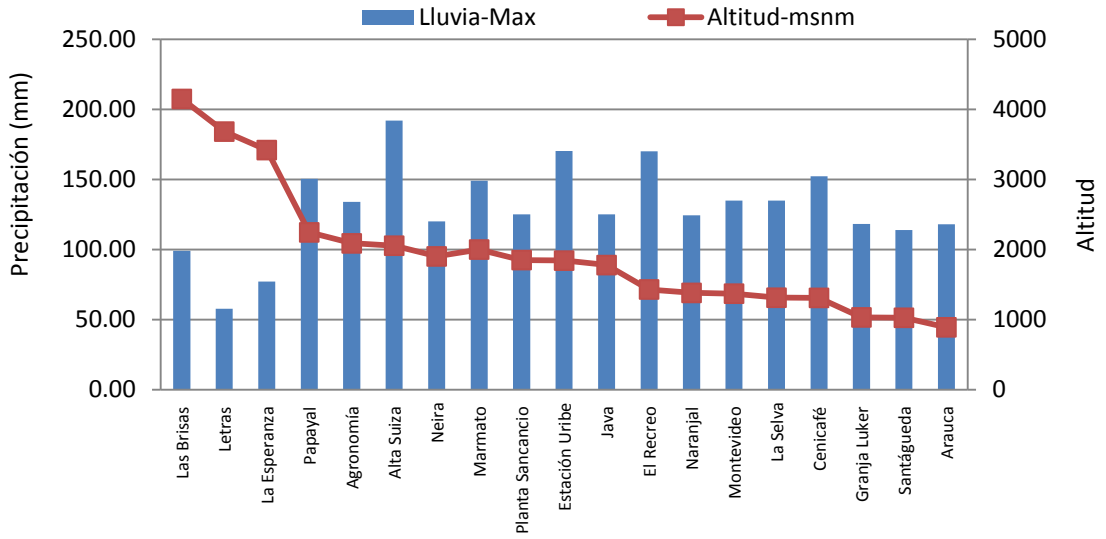
Estación	Anomalía en la precipitación anual, %				Anomalía
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	Promedio %
La Esperanza				-1,11	-1,11
Papayal				2,01	2,01
Agronomía		0,09	-1,98	1,70	-0,06
Alta Suiza				8,64*	8,64
Neira				7,37	7,37
Marmato			-5,49	-4,13	-4,81
Sancancio			1,57	0,18	0,87
La Uribe				2,98	2,98
El Recreo				5,4	5,4
Naranjal		0,39	2,80	4,31	2,5
Montevideo			-8,28*	-1,16	-4,72
Cenicafé	0,75	-2,04	2,49	1,92	0,78
Granja Lúker			1,38	1,18	1,28
Santágueda			0,87	2,46	1,67
Arauca				3,09	3,09

*Diferencias significativas

6.5.2 Eventos extremos

La precipitación máxima diaria para las diferentes estaciones de la cuenca se resume en la Figura 6.16 . A escala diaria, las lluvias máximas reportadas para el período 1981-2010, ascienden a 99 mm en la zona de páramo, 150 mm en la cuenca alta; 192 mm en la cuenca media-alta; 170 mm en la cuenca media y 118 mm en la baja; las estaciones donde se presentaron los valores máximos fueron Alta Suiza, Estación La Uribe y El Recreo.

Figura 6.16: Precipitación máxima estaciones cuenca del río Chinchiná



Se evidencia el incremento de los eventos de lluvia extremos en las estaciones; se registra un aumento en la frecuencia de las precipitaciones con valores iguales o mayores al percentil 95 y al percentil 99 de la serie histórica, como se observa en las Figura 6.17 y Figura 6.18, respectivamente, las cuales fueron calculadas a partir del análisis de frecuencias de la serie.

Figura 6.17: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 95

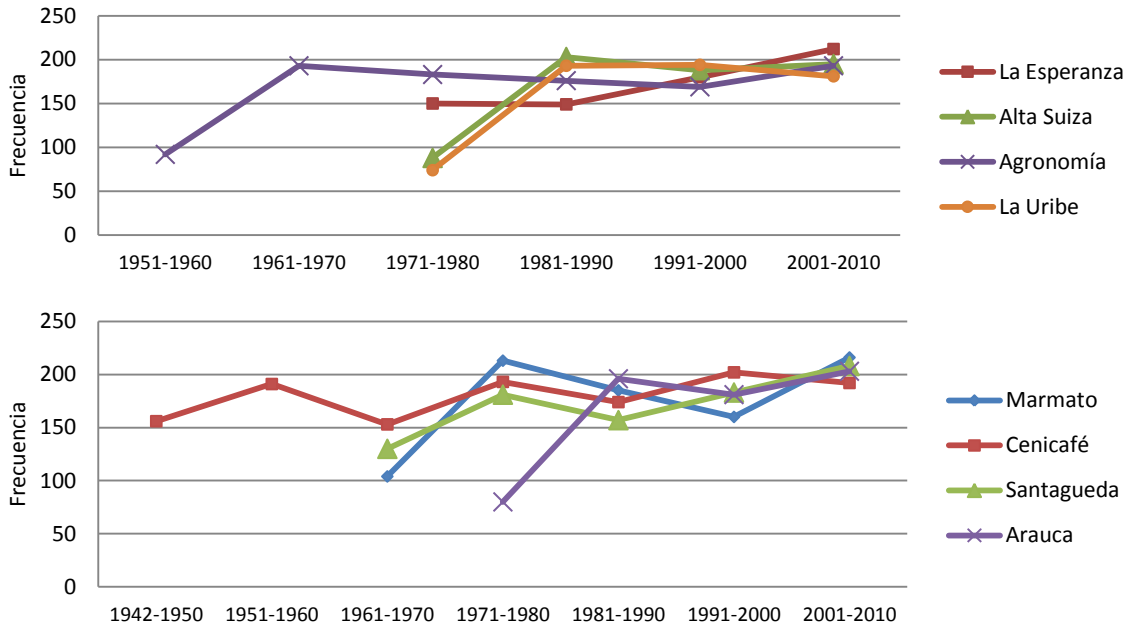
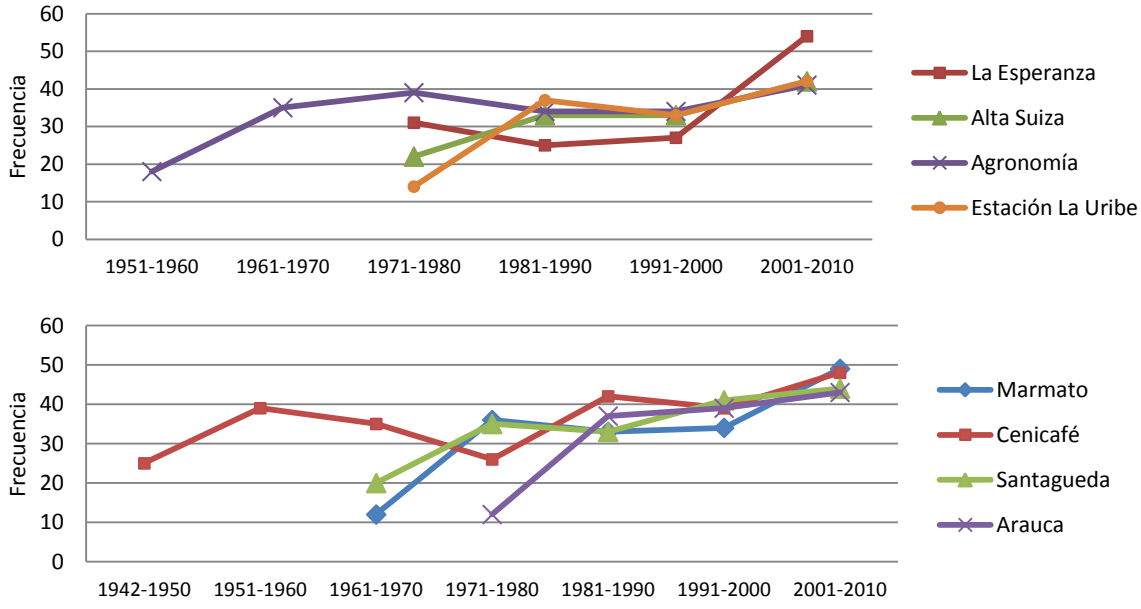


Figura 6.18: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 99



Las tormentas de lluvia son comúnmente modeladas utilizando la distribución de Valor Extremo Tipo I (Chow, 1953; Tomlinson, 1980). (Chow, 1994). La función de distribución teórica de probabilidad más usada, en general, para estudiar los valores extremos de las variables meteorológicas, es la función de Gumbel (Silva, 1998). Sin embargo existen otras funciones de distribución que pueden ser empleadas como: TCEV (Two Component Extreme Value), GEV (Generalized Extreme Value), Lognormal 2, Log Gumbel, entre otras. Las lluvias máximas son muy sensibles a la función de distribución de probabilidades asumida. En el Valle del Aburrá por ejemplo, siguen una función de distribución de probabilidades de Pareto Generalizada (Poveda, 2011).

Para establecer la distribución de probabilidades que mejor se ajusta a los valores máximos de precipitación registrados en la cuenca, se emplea el software AFINS 2.0 desarrollado por el Grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología del Departamento de ingeniería Hidráulica y medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Éste software realiza el análisis de frecuencia de extremos utilizando información sistemática y no sistemática. Está desarrollado en un ambiente IDL (Interactive Data Language), y puede ser ejecutado utilizando IDL Virtual Machine 6.1.

El AFINS 2.0 realiza la estimación de parámetros óptimos mediante el método de la Máxima Verosimilitud. Si x1, x2,…..xn son los valores observados de una muestra aleatoria de tamaño n, La función de verosimilitud o probabilidad conjunta de la muestra es:

$$L(Y) = f(x1,Y)* f(x2,Y)*\ldots\ldots\ldots\ldots f(xn,Y) \quad \text{Ec. (6.1.)}$$

La función de verosimilitud es una función del parámetro desconocido Y. El estimador de máxima verosimilitud de Y es el valor que maximiza la función de probabilidad conjunta L(Y).

Los resultados del análisis de verosimilitud para las diferentes estaciones pluviométricas se presentan en la Tabla 6.16. De acuerdo con el análisis gráfico, se presenta buen ajuste con las distribuciones GEV (Generalized Extreme Value), TCEV (Two Component Extreme Value), LOGNORMAL2 y GUMBEL. Sin embargo, en la mayoría de las estaciones la máxima verosimilitud se obtiene con la función de probabilidad GEV. La Figura 6.19 presenta las gráficas de ajuste de distribución de probabilidad GEV, para las lluvias máximas observadas en las estaciones ubicadas en la cuenca del río Chinchiná.

Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

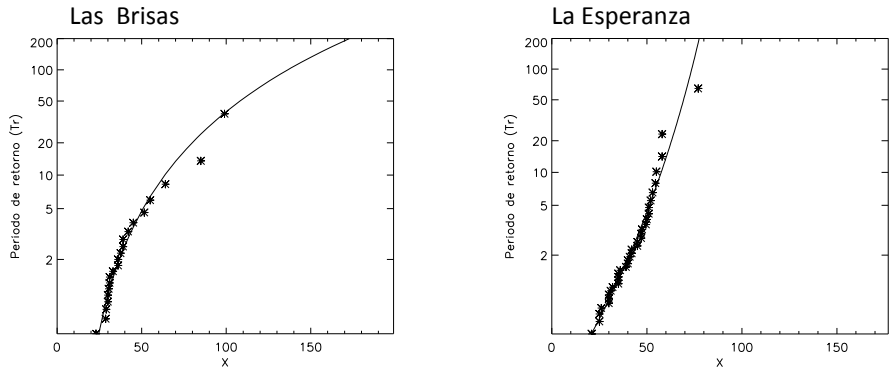


Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

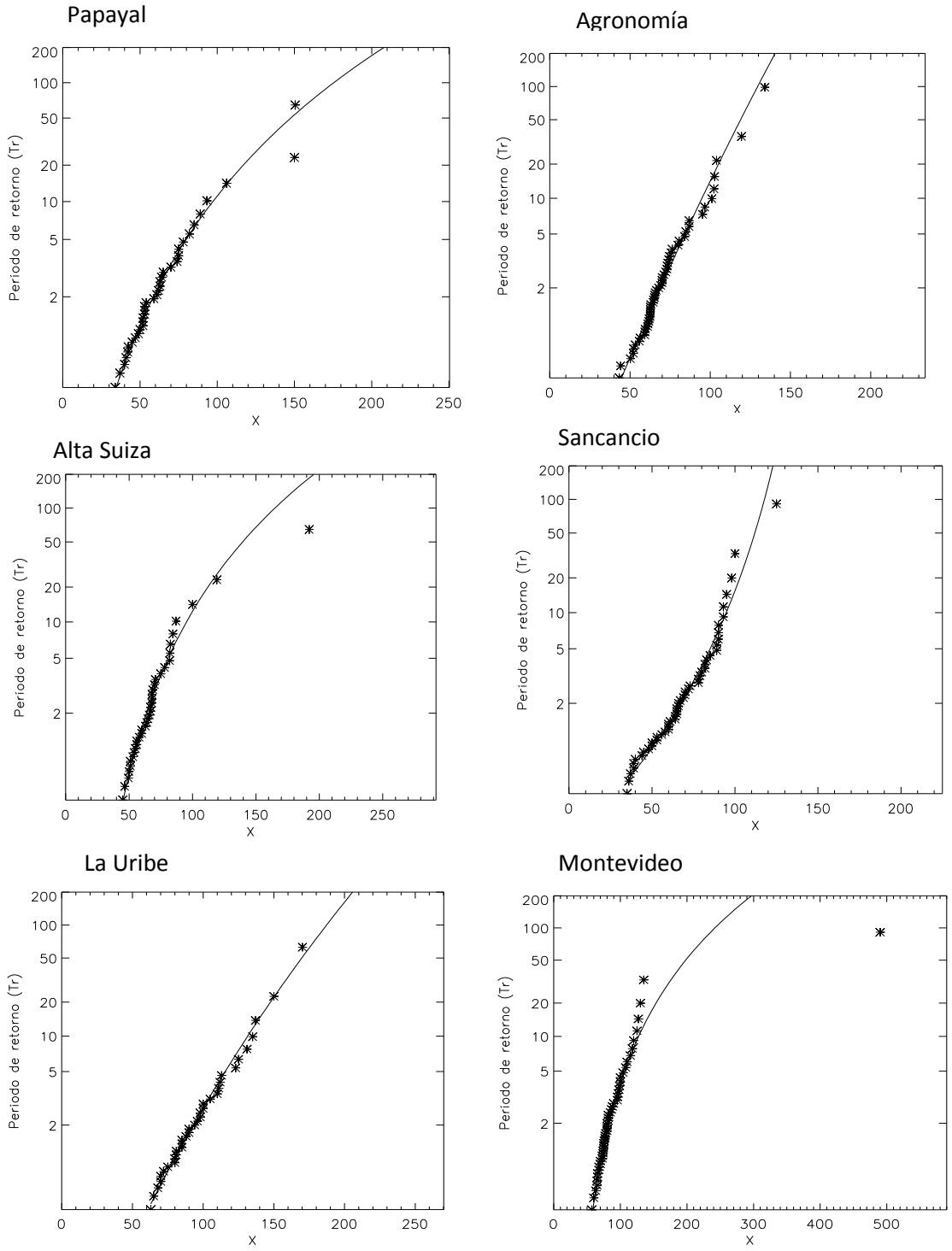


Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

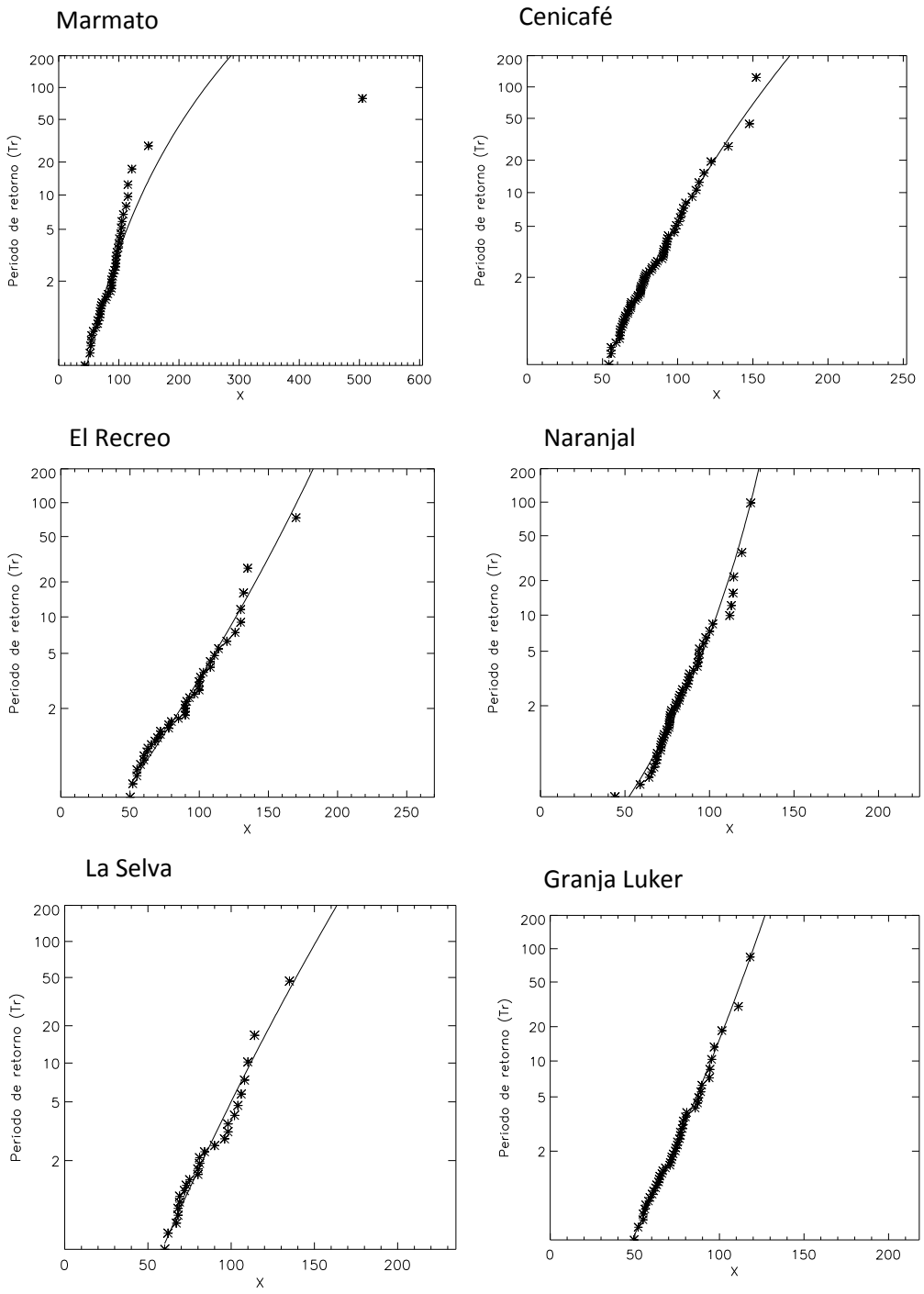


Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

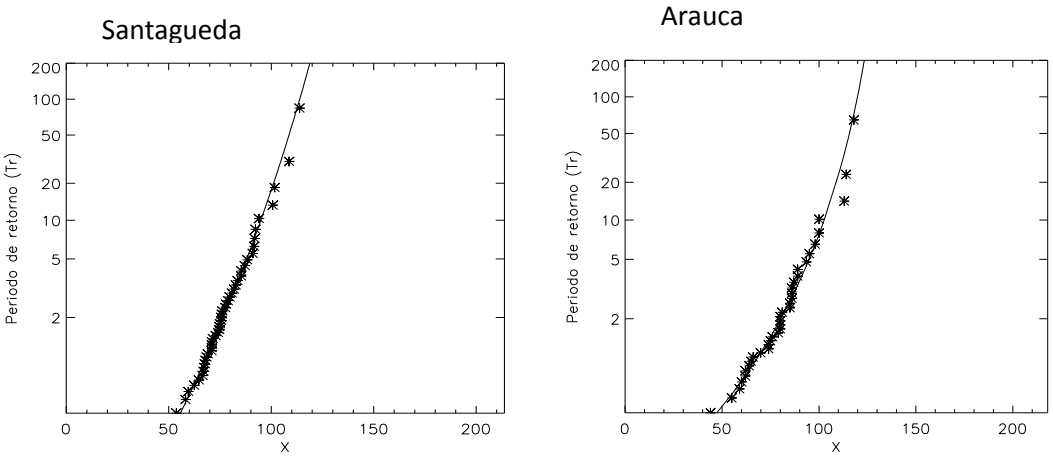


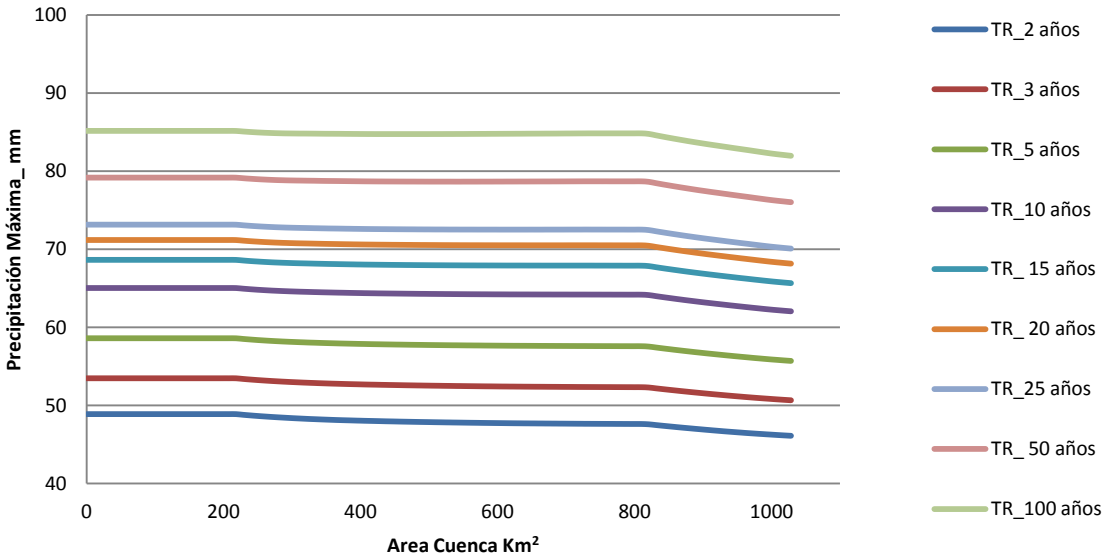
Tabla 6.16: Análisis de verosimilitud o probabilidad conjunta

	Verosimilitud						
Estaciones	Gumbel	TCEV	GEV	LOGNORMAL2	LOGGUMBEL	EXPONENCIAL	MAXIMO
Las Brisas	-85.54	-82.38	-82.84	-85.68	-82.99	-99.30	TCEV
La Esperanza	-139.02	-139.04	-138.53	-138.64	-142.11	-170.52	GEV
Papayal	-160.70	-160.70	-158.99	-160.94	-159.05	-186.05	GEV
Agronomía	-229.46	-229.49	-229.37	-230.67	-230.83	-289.58	GEV
Alta Suiza	-154.35	-154.52	-151.15	-156.39	-151.26	-188.61	GEV
Sancancio	-224.96	-224.97	-223.65	-224.39	-229.85	-265.90	GEV
Uribe	-159.23	-159.20	-159.10	-159.68	-159.42	-195.54	GEV
Marmato	-216.70	-206.19	-210.15	-215.46	-210.56	-244.02	TCEV
Montevideo	-241.69	-227.27	-228.28	-243.08	-229.24	-282.53	TCEV
Cenicafe	-298.60	-298.66	-298.14	-300.24	-298.49	-373.84	GEV
El Recreo	-191.87	-192.40	-191.79	-191.66	-193.50	-225.28	LOGNORMAL2
Java	-127.43	-129.50	-126.99	-126.91	-130.20	-163.99	LOGNORMAL2
La Selva	-111.40	-113.74	-111.38	-111.72	-111.53	-141.67	GEV
Naranjal	-229.84	-232.19	-228.13	-228.33	-236.54	-297.62	GEV
Granja Luker	-192.52	-196.27	-192.42	-192.69	-193.81	-249.18	GEV
Santagueda	-184.20	-186.68	-183.76	-184.10	-185.95	-251.31	GEV
Arauca	-153.67	-155.07	-151.90	-152.48	-157.61	-194.13	GEV

Empleando el programa generador de curvas Precipitación-Área-Duración (24 Horas) -Frecuencia-PADF- del modelo CAPRA, con la información de las estaciones de la cuenca, se elabora la Figura 6.20, la cual representa las probabilidad de ocurrencia de lluvias máximas según el área de la

cuenca. Para la cuenca alta y media, las lluvias máximas para los diferentes períodos de retorno son prácticamente iguales, mientras que hay una ligera disminución en la cuenca baja.

Figura 6.20: Curvas de Precipitación-Área-Duración (24 horas)-Frecuencia



6.6 Escorrentía Superficial

A escala diaria las series observadas de caudal no se distribuyen normalmente. El comportamiento de los caudales medios interdecadales se presenta en la Figura 6.21. Comparando la última década con las anteriores, la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis indica que hay diferencias estadísticas (α = 0,05) en las estaciones. Iguales resultados se obtienen con los caudales promedio mensual.

El comportamiento de las series promedio tridecadales, obtenidas a partir de los caudales diarios observado, se presenta en la Figura 6.22. Se observa reducción de caudal en Montevideo y aumento de El Retiro. El análisis de varianza empleando pruebas no paramétricas indica que hay diferencias estadísticas significativas (α = 0,05) entre los períodos en ambas estaciones. La distribución de los caudales a escala mensual se representa en la Figura 6.23, con mayores caudales en los meses de abril-mayo y octubre-diciembre; lo menores caudales se registran para el mes de agosto (Figura 6.25).

Figura 6.21: Caudales promedio interdecadales

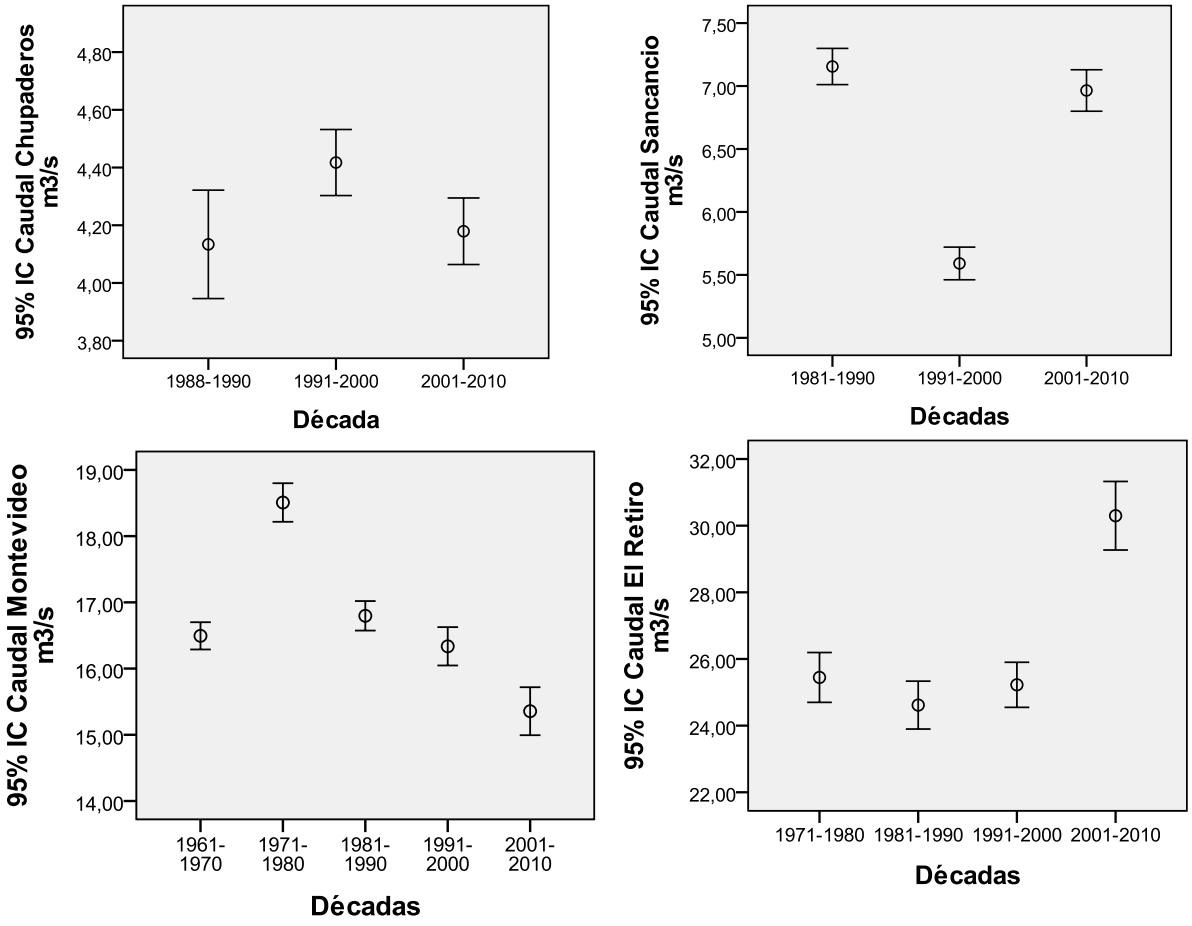


Figura 6.22: Caudales promedio tridecadales

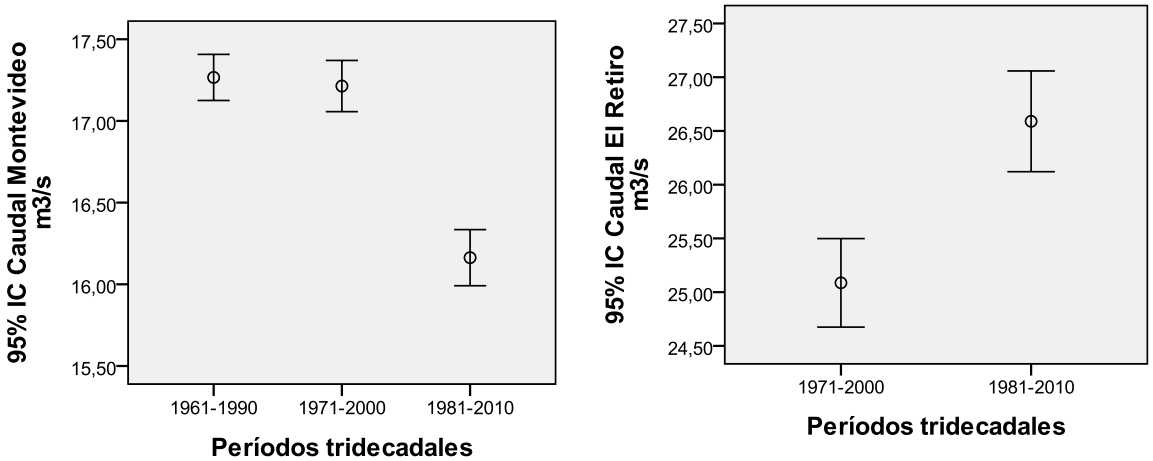
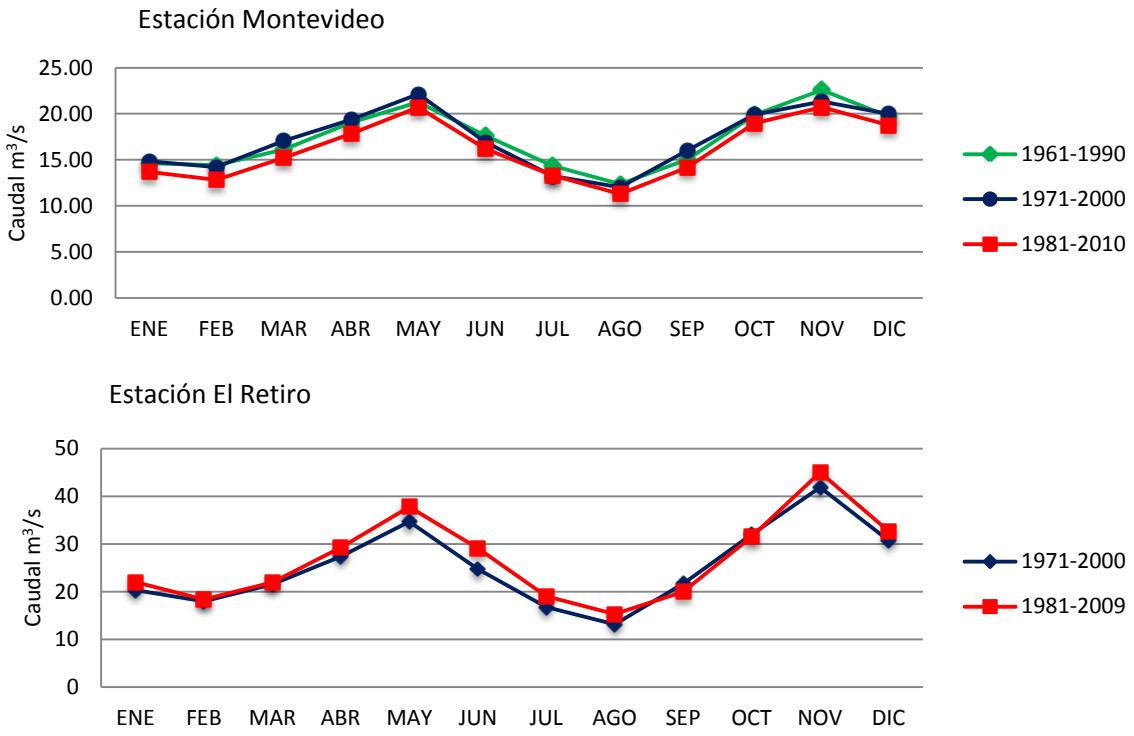
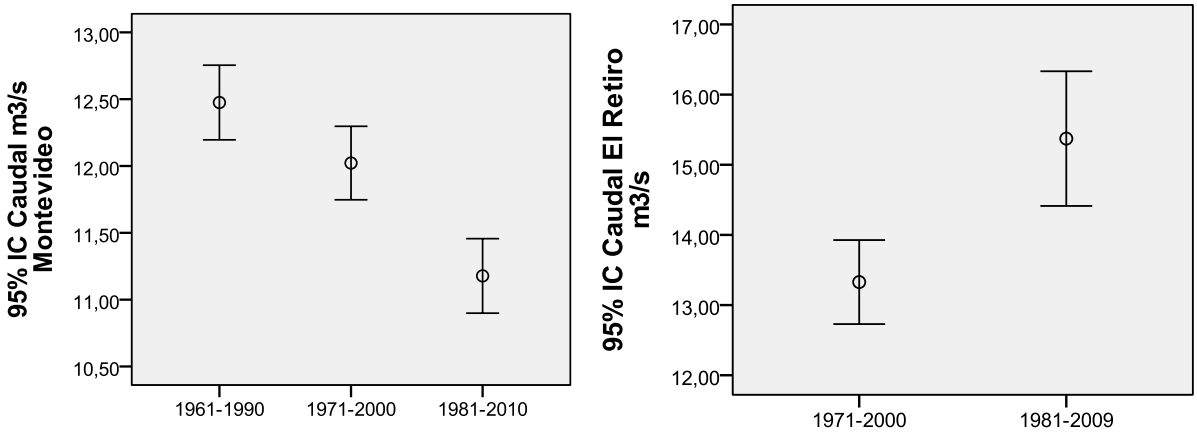


Figura 6.23: Distribución de caudales promedio tridecadales



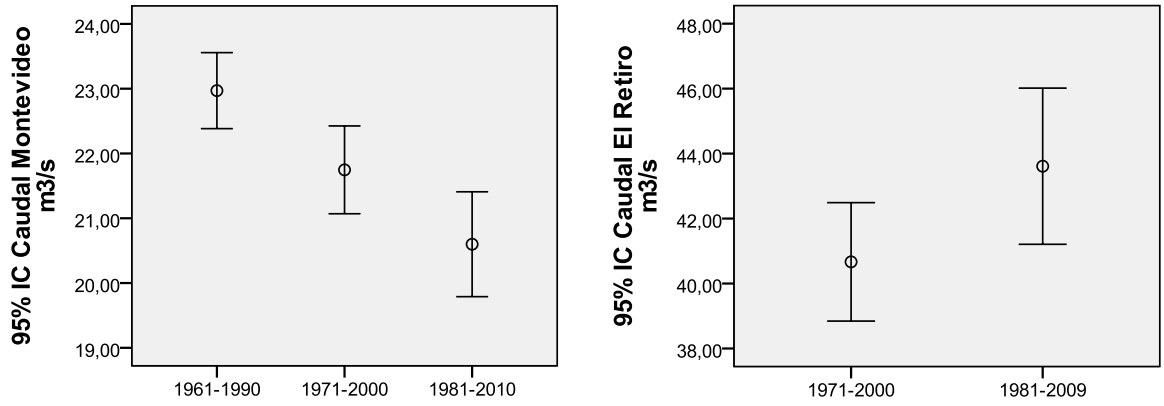
Para el mes más seco- agosto- se realiza el análisis por períodos interdecadales (Figura 6.24), donde se evidencia la reducción significativa de caudal (α = 0,05), en la estación Montevideo, alrededor de 1 m^3/s; mientras que en la estación El Retiro se observa un aumento, estadísticamente significativo (α = 0,05), 2 m^3/s en promedio.

Figura 6.24: Caudales promedio tridecadales – Agosto



Para el mes más lluvioso - noviembre, el análisis interdecal indica reducción significativa (α = 0,05), en Montevideo; sin embargo en la estación El Retiro si bien se aprecia el aumento en la Figura 6.25, estadísticamente no hay diferencias significativas (α = 0,05).

Figura 6.25: Caudales promedio tridecadales- Noviembre



El resumen de los cambios presentados se consolida en la Tabla 6.17; se reporta la anomalía del último período (1981-2010), con respecto al período inmediatamente anterior (1971-2000). En la estación Montevideo se tiene una disminución en el caudal del 6%, mientras que en la estación El Retiro incremento del caudal 6%, de acuerdo con los registros observados en las estaciones.

Tabla 6.17: Anomalías en los caudales observados

Caudales - m^3/s	Montevideo			El Retiro		
	1971-2000	1981-2010	Anomalía %	1971-2000	1981-2009	Anomalía %
$Q_{promedio}$	17,21	16,14	-6,2*	25,09	26,60	+6,0*
Q_{medio} (P_{50})	15,18	14,22	-6,2	18,10	18,20	+0,6
Q_{medio}Int.	15,71	14,99	-4,5	23,46	26,50	+7,0
$Q_{max\text{-}extremos}$	66,69	226,87	240%	289,00	316,60	+9,6
$Q_{min\text{-}extremos}$	3,57	3,07	-14%	2,00	2,40	+20,0
$Q_{amb.}$(P_{75})	11,32	10,77	-4,9	11,00	11,85	+7,72

*Diferencias significativas (α = 0,05)

Los resultados de la simulación hidrológica, a escala diaria, con el modelo TETIS para las series históricas se resumen en la Tabla 6.18; se emplearon los parámetros de la Tabla 5.1 para la estación El Retiro y de la Tabla 5.10 para las estaciones Chupaderos, Sancancio y Montevideo. Para el período 1961-1990, sólo se tienen registros para el cálculo de los errores de balance en la estación Montevideo, los cuales son muy buenos sólo del -4,5%; dichos errores continúan siendo

bajos para el período 1971-2000, en las estaciones El Retiro y Montevideo en las cuales se tienen registros históricos. De acuerdo con la simulación, se esperaría una reducción en el flujo en el transcurso del tiempo; las anomalías estimadas a partir de los caudales simulados, con respecto al período inmediatamente anterior, se resumen en la Tabla 6.19, en promedio la reducción es del 3,7%.

Tabla 6.18: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala diaria

Estación	Período Histórico- Caudales m^3/s					
	1961-1990	**Balance, %**	**1971-2000**	**Balance; %**	**1981-2010**	**Balance,%**
El Retiro	27,22	ND	26,01	-3,7%	25,53	4,2%*
Montevideo	16,50	4,45%	15,92	7,5%	15,61	3,3%
Sancancio	7,01	ND	6,62	ND	6,32	5,2%
Chupaderos	4,57	ND	4,49	ND	4,23	ND

*Comparación con el período 1981-2009.

Tabla 6.19: Anomalías estimadas en los caudales promedio –escala diaria

Estación	Anomalías en caudales simulados m^3/s	
	1971-2000	**1981-2010**
El Retiro	-4,5%	-1,8%
Montevideo	-3,6%	-1,9%
Sancancio	-5,6%	-4,5%
Chupaderos	-1,7%	-5,7%

*Comparación con el período 1981-2009.

Con los modelos de escala mensual, que tuvieron desempeño satisfactorio en la modelación hidrológica de las condiciones presentes (1981-2010), se realiza la simulación para el período 1971-2000, en la estación El Retiro; los resultados comparativos se presentan Tabla 6.20. Con el modelo Thomas se estiman reducciones en el caudal del 10%; mientras que con el modelo ARMA no se encuentran cambios significativos.

Tabla 6.20: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala mensual

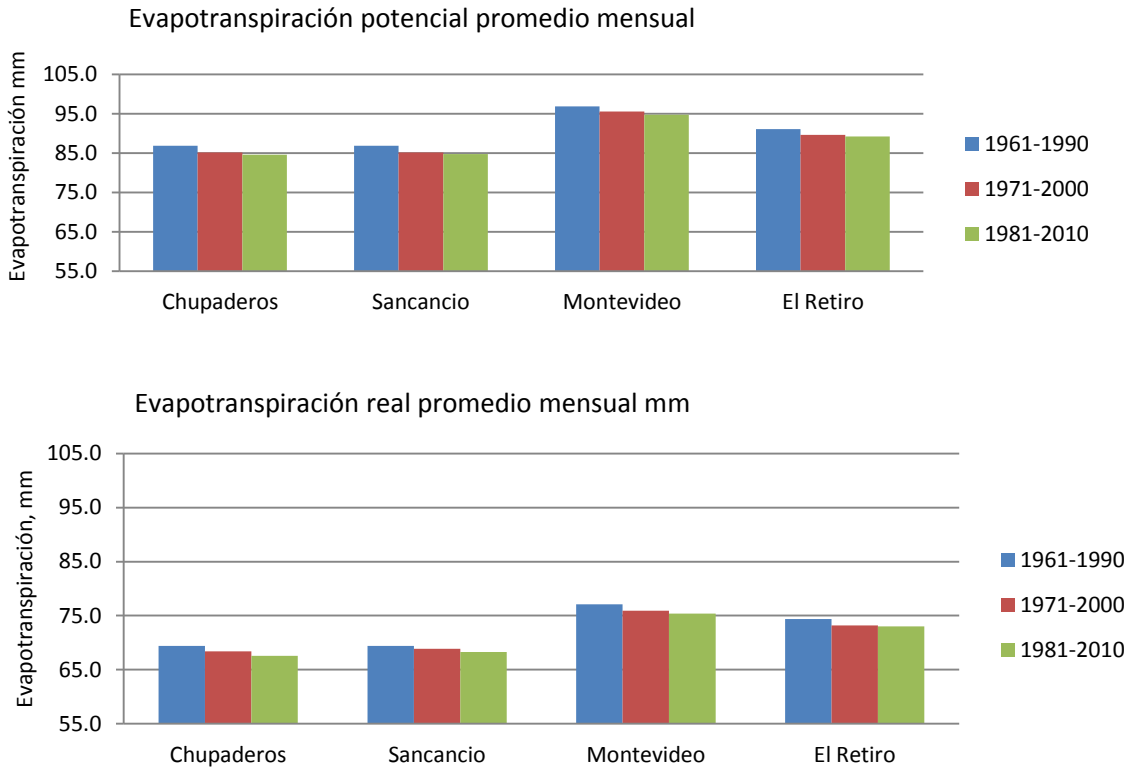
Modelos	**1971-2010**				**1981-2010**	
	Caudal m^3/s	**Balance**	**NASH**	**Interpretación del Modelo**	**Caudal m3/s**	**Cambio Caudal, %**
Caudal Observado	**25,09**				**26,57**	6,0%
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	25,54	1,8%	0,63	Satisfactorio	25,05	-1,9%
Modelo Thomas abcd	27,04	7,8%	0,62	Satisfactorio	24,27	-10%
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1) Salas y Smith	27,98	11,5%	0,56	Satisfactorio	28,01	0,1%

En general, las diferencias entre los caudales observados y simulados, se presentan por los errores de balance (< 5% en El Retiro), o por cambio en el uso del suelo, los cuales no fueron considerados en esta investigación. Sin embargo debe tenerse en cuenta que el río Guacaica, uno de los principales aferentes del Chinchiná, nace en la zona de páramos y desemboca después de la estación Montevideo. Por tanto, podría atribuirse en parte, el incremento del caudal observado en la estación El Retiro (aumento de caudal en agosto), al retroceso de los nevados, el cual no fue considerado en la modelación hidrológica.

6.7 Evapotranspiración

Con base en los resultados de la simulación, el comportamiento de la evapotranspiración potencial y real en el tiempo se observa en la Figura 6.26; se observa disminución en el tiempo, consistente con las tendencias en radiación solar.

Figura 6.26: Comportamiento evapotranspiración potencial y real



7. Alteraciones por variabilidad climática

La identificación de la ocurrencia de fenómenos del Niño y la Niña se realiza con índices océano-atmosféricos desarrollados por diferentes instituciones como la NOAA, las cuales registran las anomalías sobre las temperaturas del Océano Pacífico. Se analizaron las variables temperatura media, precipitación y caudal tomando como el ciclo anual de las anomalías estandarizadas, reportadas en los estudios de Poveda et al (2002, 2011).

7.1 Temperatura media

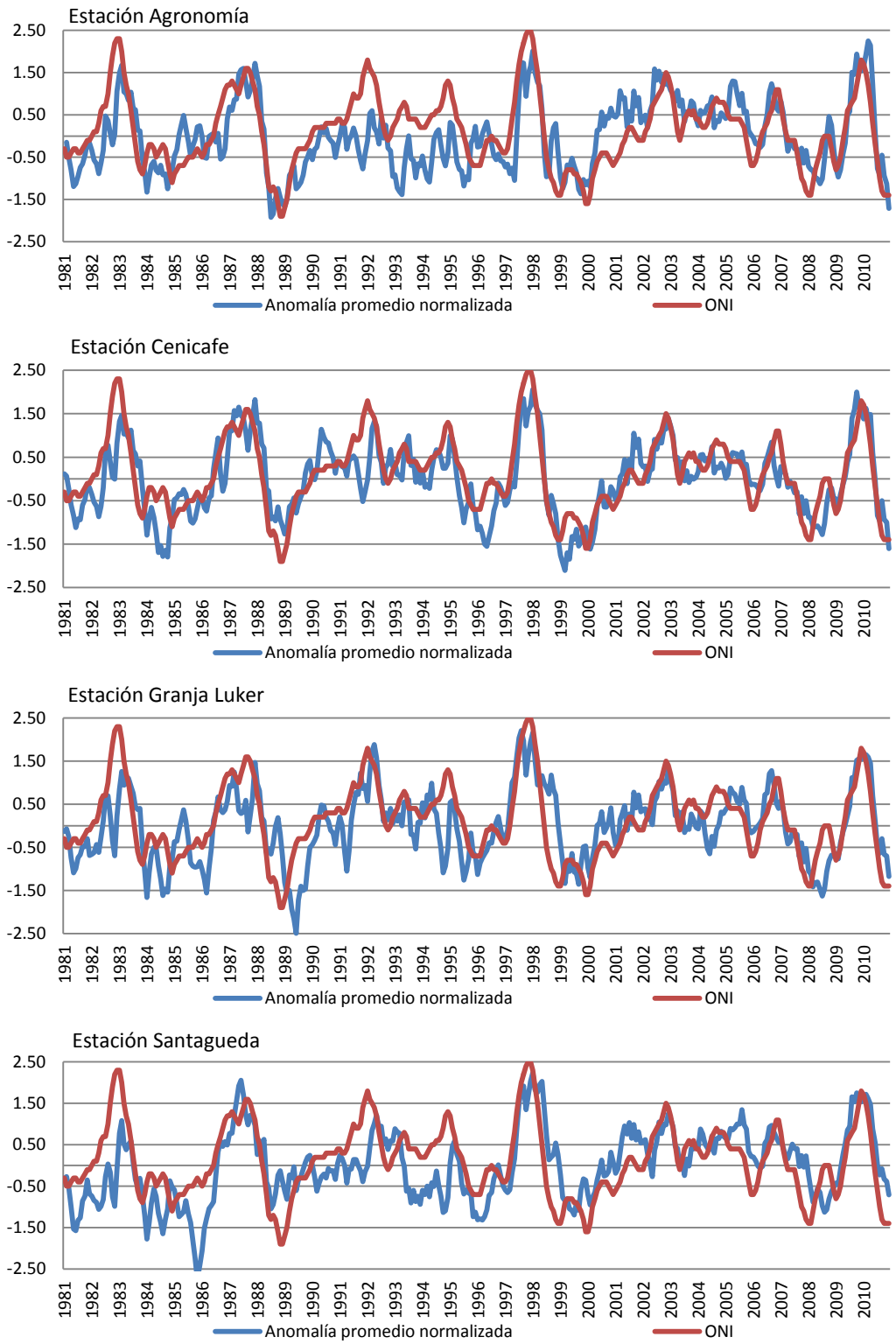
El análisis de la alteración en la temperatura media por efecto de la Oscilación del Sur - ENSO, fue realizado teniendo cuenta el índice Oceánico el Niño-ONI-, donde los valores superiores a 0,5°C corresponden a eventos cálidos -el Niño- mientras que los inferiores a –0,5°C a los episodios fríos-la Niña-. Cada estación se analizó para el período 1981-2010, tomando como base dicho índice y las anomalías estandarizadas.

La Figura 7.1 muestra la evolución de las anomalías estandarizadas en la temperatura promedio acumulado trimestral y el índice oceánico ONI. Se observa un comportamiento similar entre las estaciones con relación directa entre ambas variables. Los coeficientes de correlación son de 0.65, 0.78, 0.66 y 0.58 para las estaciones Agronomía, Cenicafé, Granja Luker y Santagueda, respectivamente.

Aunque cada evento de La Niña, tiene sus particularidades, la anomalía promedio estandarizada es -0.60 en Agronomía, -0.8 en Cenicafé, -0.55 en Granja Luker y -0.53 en Santagueda. Por otra parte para el fenómeno del Niño la anomalía promedio estandarizada es 0.64, 0.73, 0.68 y 0.65 en las mismas estaciones, respectivamente.

Para el período 1981-2010, los eventos más intensos del Niño se presentaron en 1997-1998 y en 2009-2010 con anomalías estandarizadas superiores a 1.5. Para la Niña, por su parte, los fenómenos más fuertes se presentaron en el 1988-1989 y 2010-2011 con anomalías estandarizadas inferiores a -1.5.

Figura 7.1: Evolución de la anomalía estandarizada en la temperatura media y el ONI



7.2 Precipitación

La Figura 7.2 presenta el comportamiento de la anomalía estandarizada en la precipitación promedio trimestral acumulada en comparación con el valor negativo del índice oceánico ONI, para las diferentes estaciones de la cuenca en el período 1981-2010. La correlación es directa con –ONI e inversamente proporcional con ONI; los coeficientes de correlación entre las variables anomalía y ONI se muestran en la Tabla 7.1; son más altos en las estaciones ubicadas en la cuenca media-alta y media, para el período completo 1981-2010.

Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

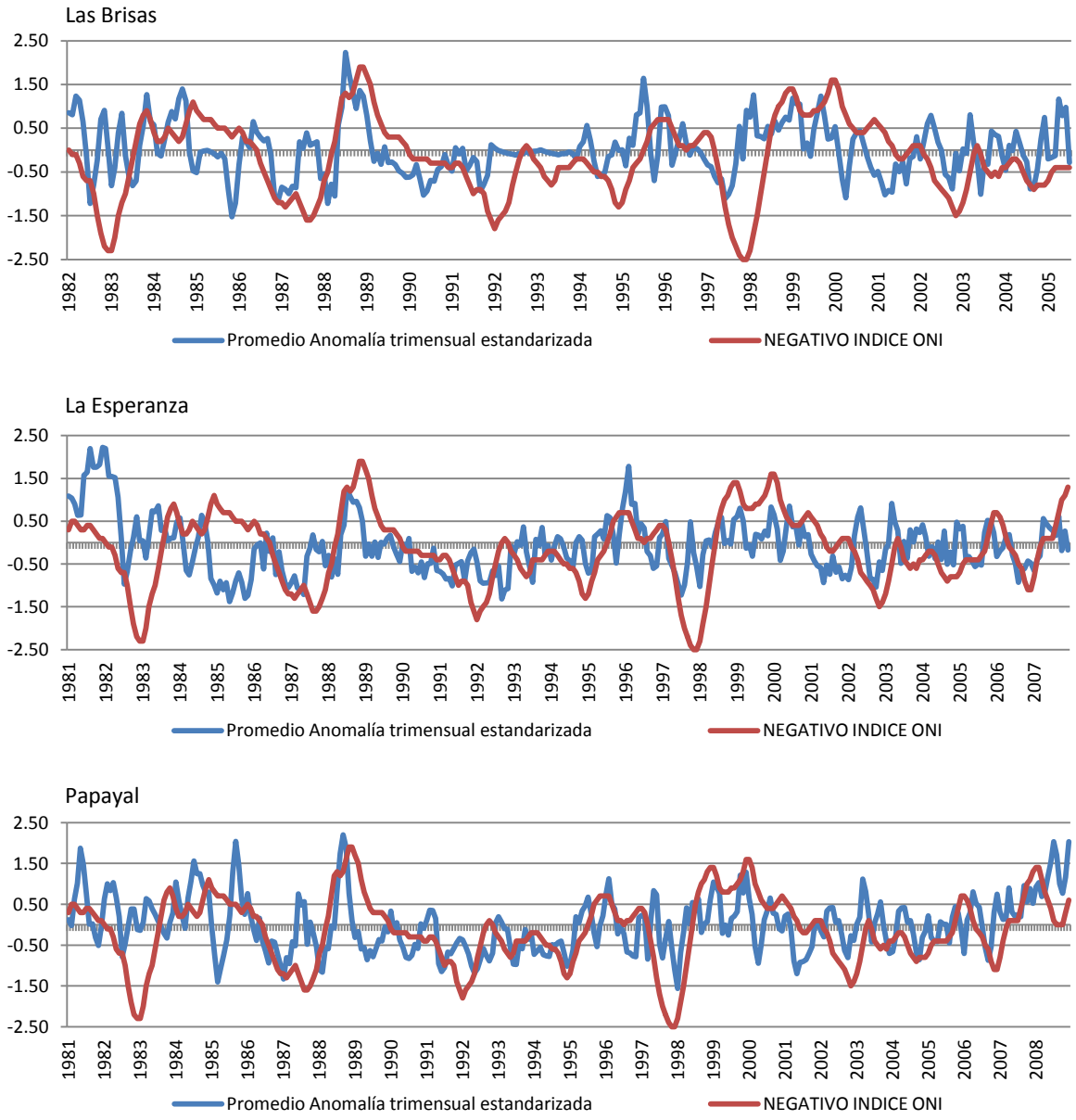


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

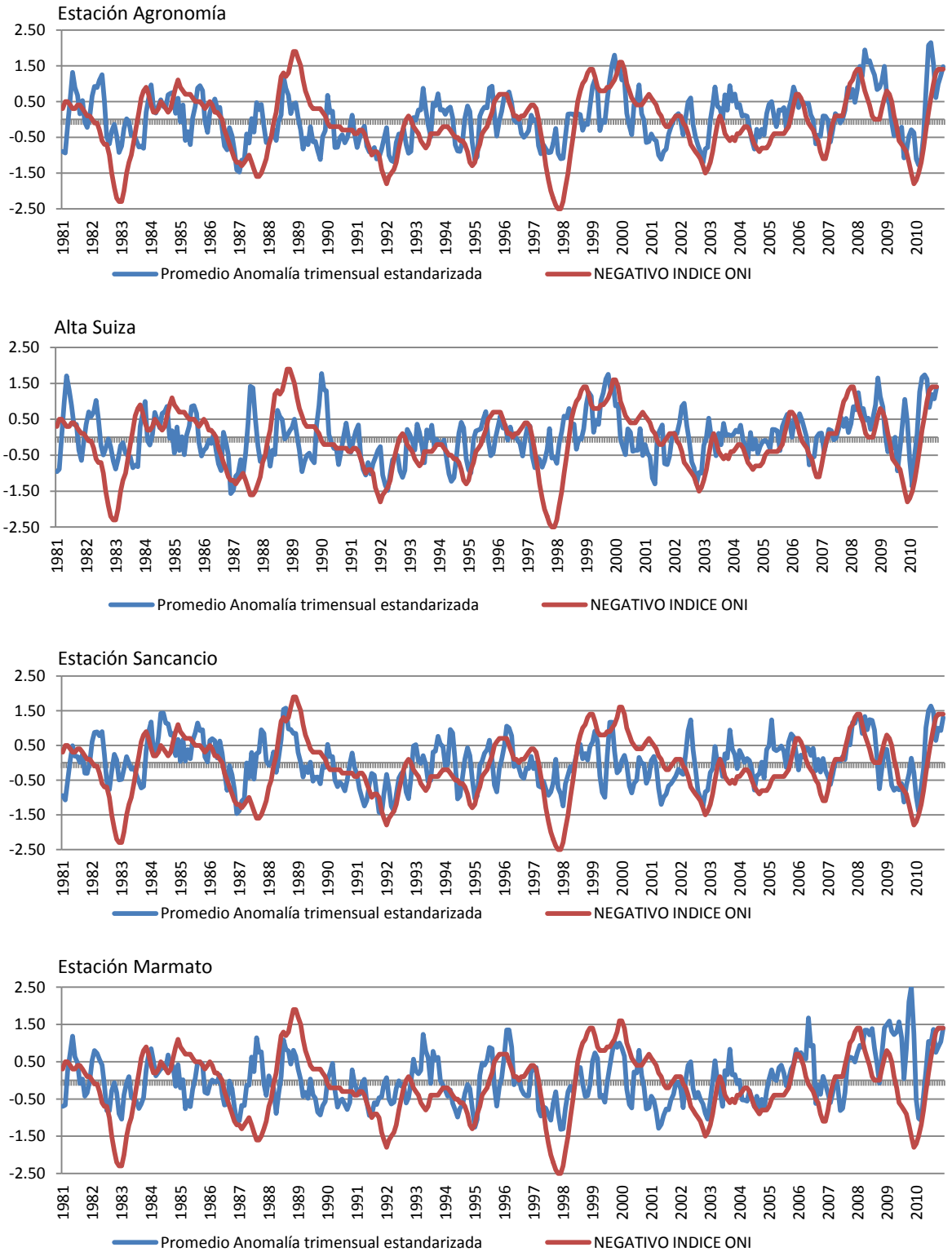


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

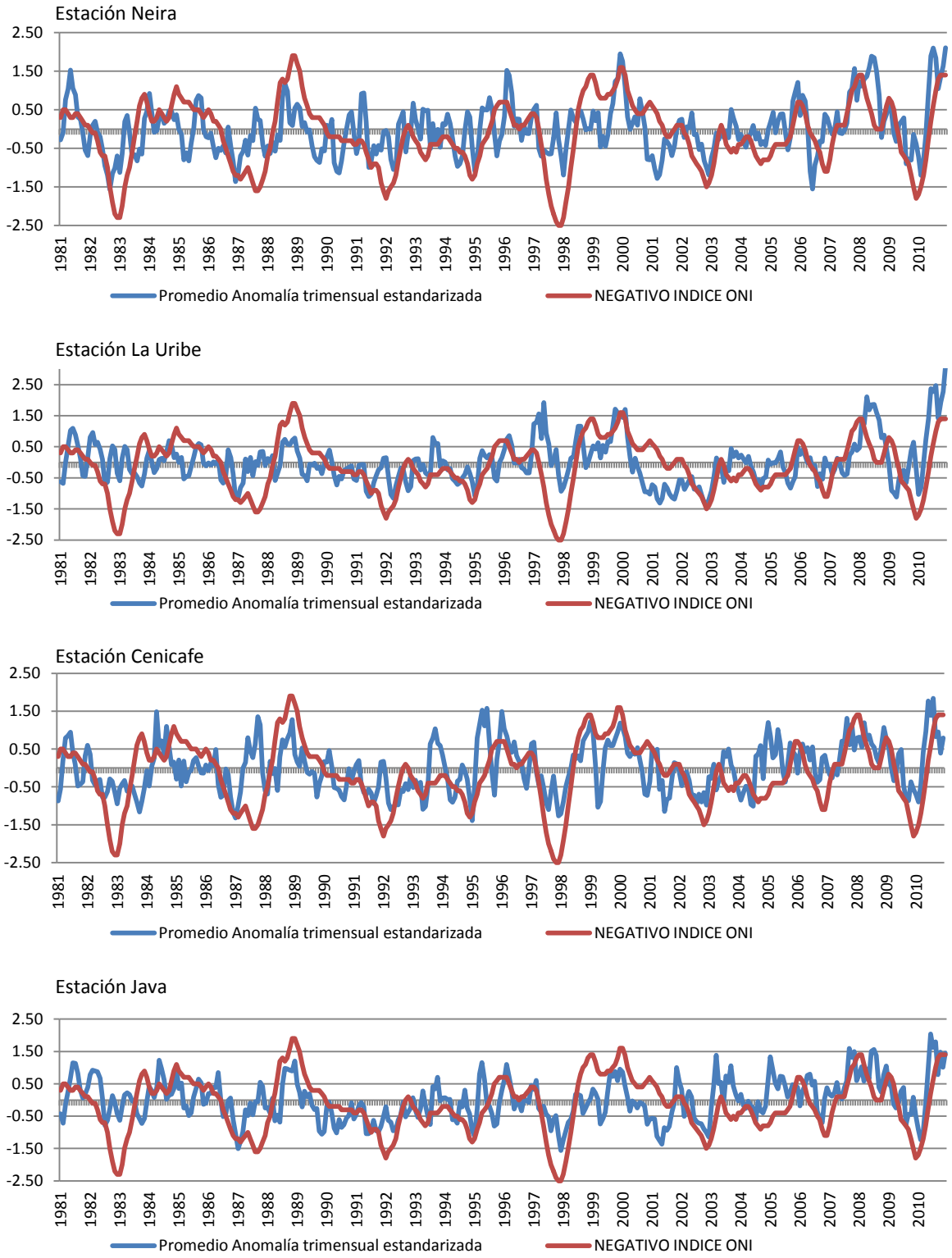


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

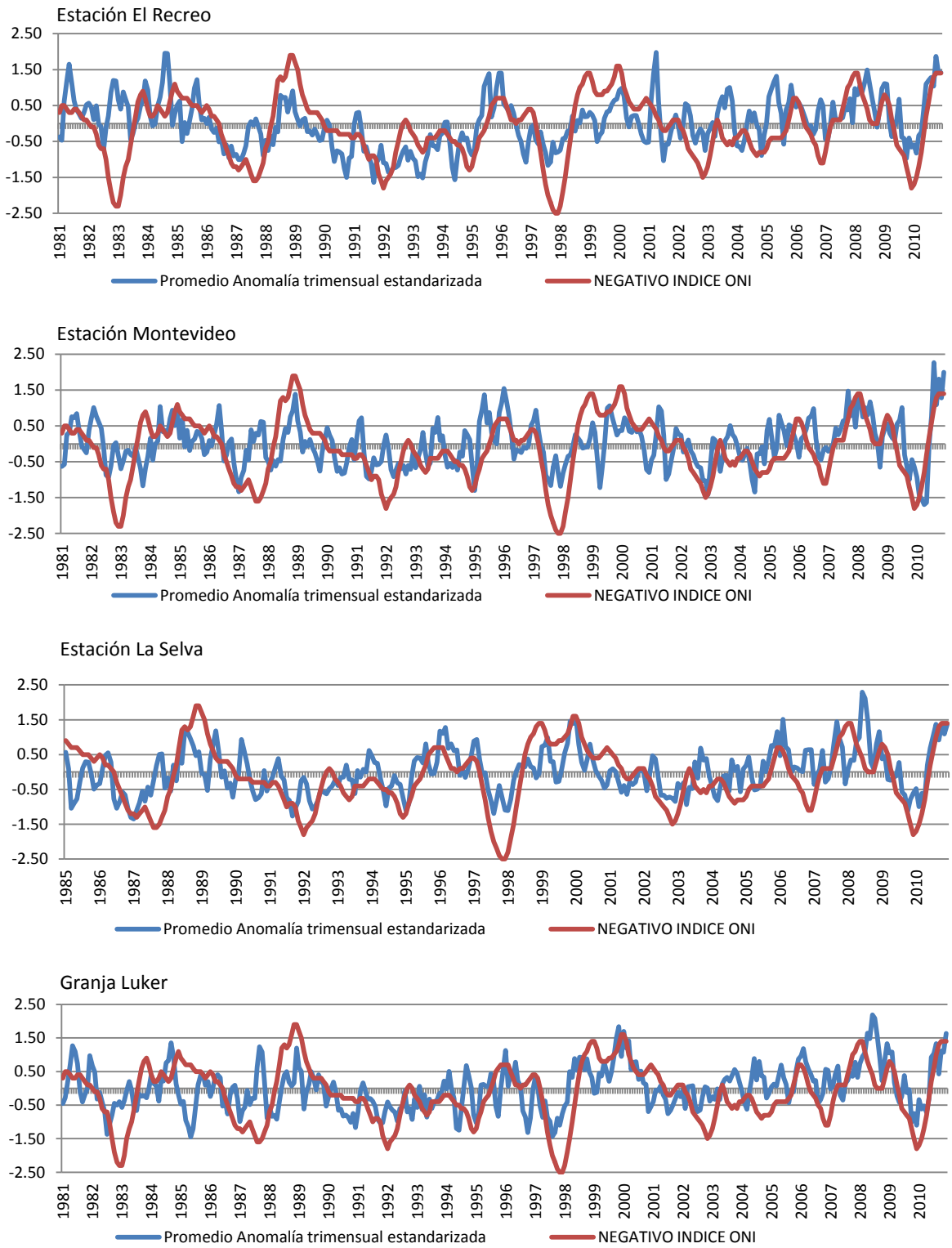


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

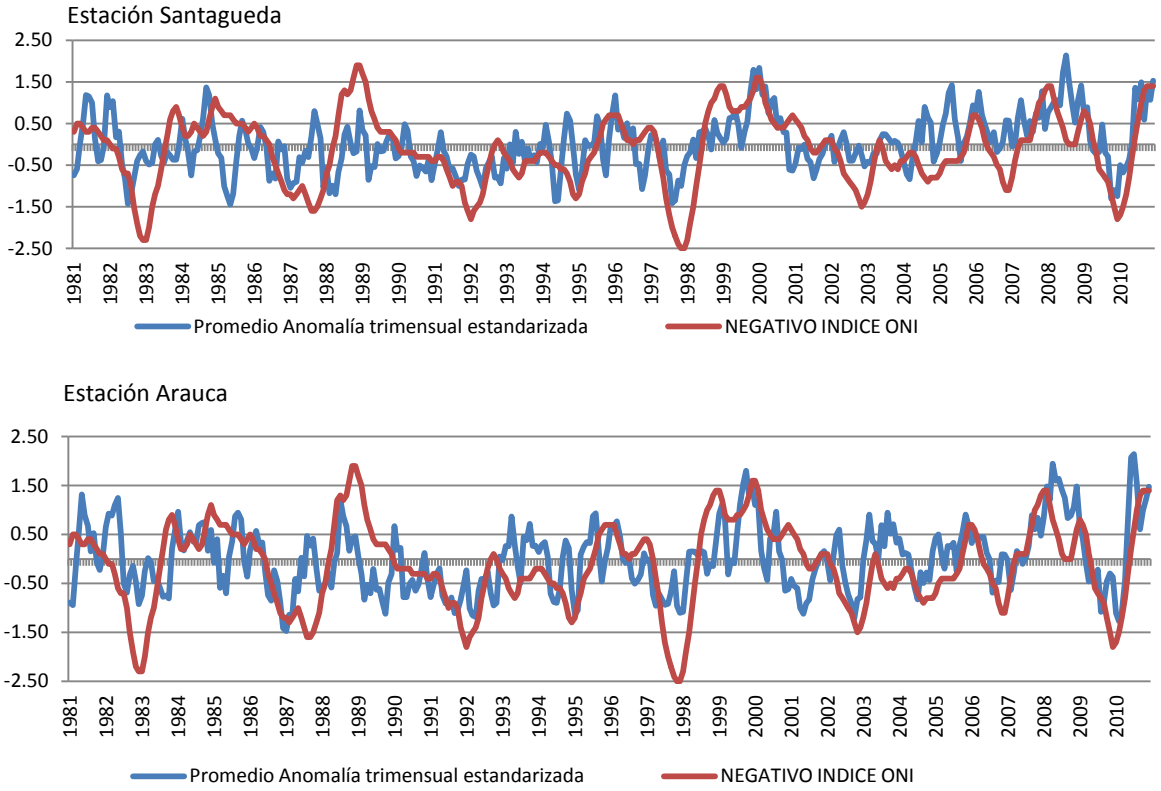


Tabla 7.1: Coeficientes de correlación Anomalía en la precipitación-índice ONI

Estación	Coeficiente de Correlación	Período
La Selva	0,58	1985-2010
Montevideo	0,51	1981-2010
Agronomía	0,50	1981-2010
Neira	0,50	1981-2010
Cenicafé	0,49	1981-2010
Granja Luker	0,48	1981-2010
Java	0,47	1981-2010
Sancancio	0,46	1981-2010
El Recreo	0,46	1981-2010
Santagueda	0,46	1981-2010
Arauca	0,46	1981-2010
Alta Suiza	0,42	1981-2010
Papayal	0,39	1981-2008
Estación La Uribe	0,38	1981-2010
Marmato	0,36	1981-2010
La Esperanza	0,30	1981-2007
Las Brisas	0,27	1982-2005

Eventos fríos La Niña. Como cada fenómeno ENSO tiene sus particularidades, se analiza el incremento en las lluvias para los distintos episodios fríos de la Niña tomando como base el índice Oceánico El Niño ONI menor que -0,5 (Figura 7.3) y el promedio de las anomalías para dichos períodos. Se calcula el valor medio de las anomalías para cada una de las subcuencas, promediando las estaciones. Se evidencia intensificación del evento por el aumento en la precipitación, en especial durante el episodio 2010-2011, en las cuencas media-alta, media y baja; para la cuenca alta no se tienen registros para este período.

Figura 7.3: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos La Niña

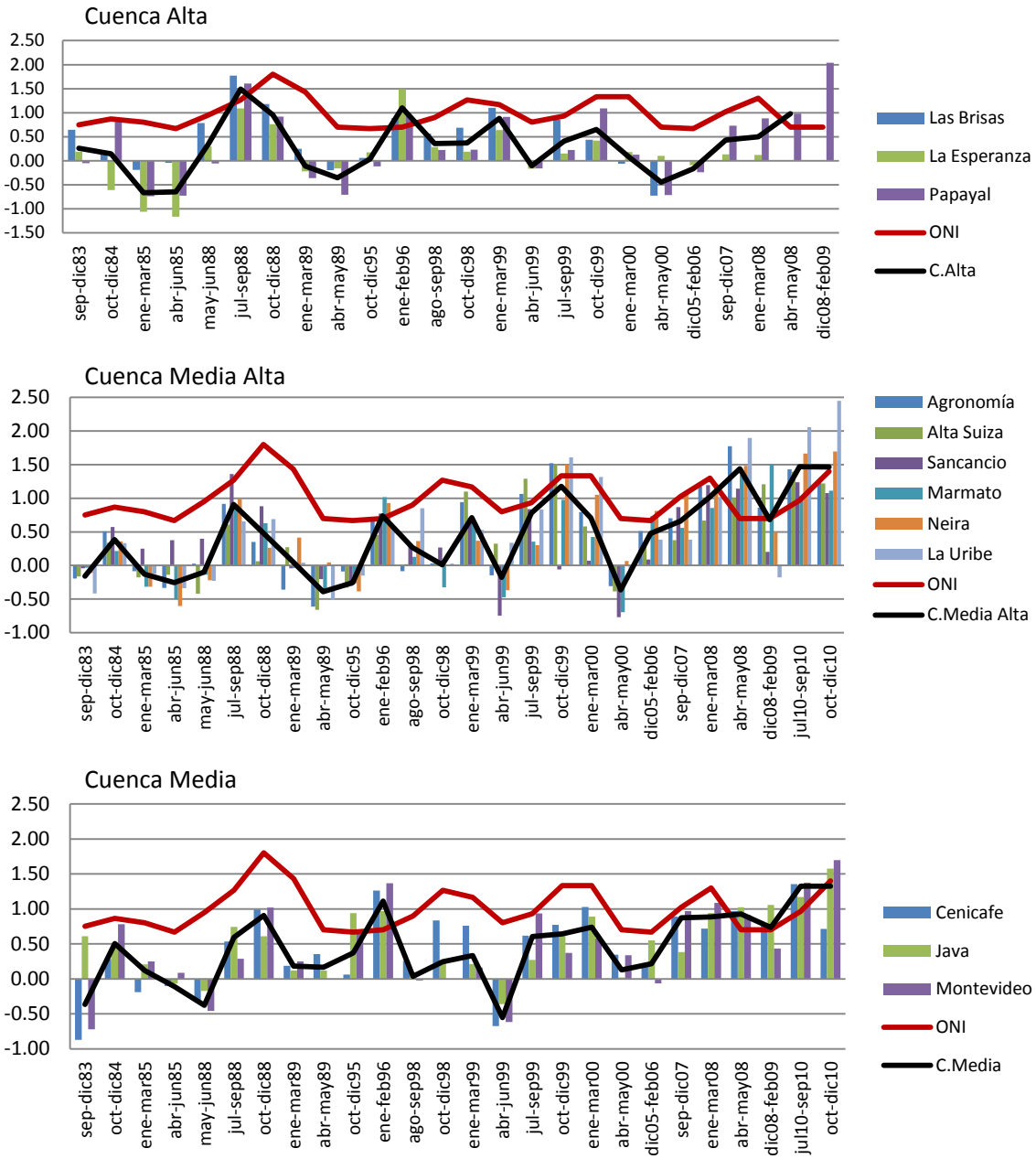
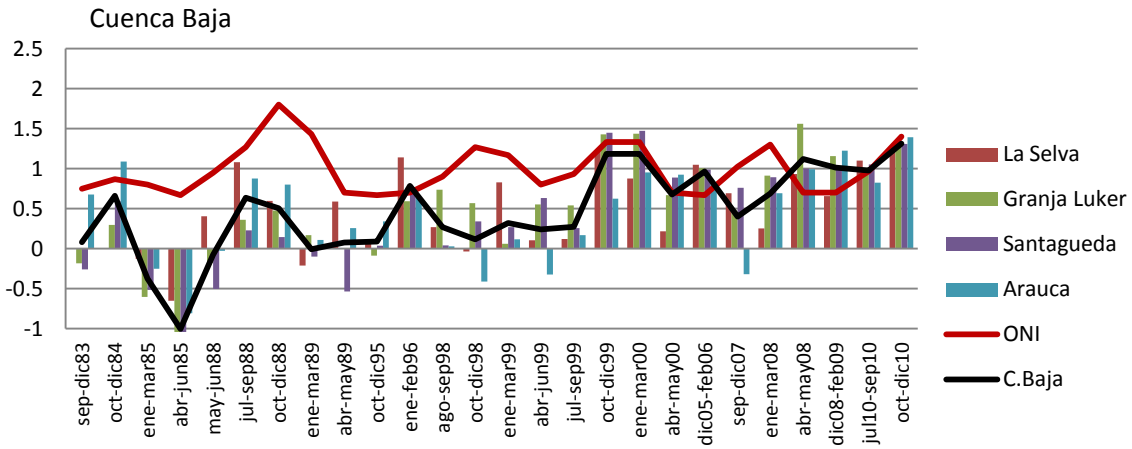


Figura 7.3: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos La Niña



Sin embargo, es más claro observar la intensificación del fenómeno si se toma una sola base de cálculo, por ejemplo el promedio mensual multianual y se evalúa el porcentaje de incremento en la precipitación media en cada uno de los períodos, como se muestra en la Figura 7.4.

Figura 7.4: Cambios en la precipitación durante eventos fríos La Niña

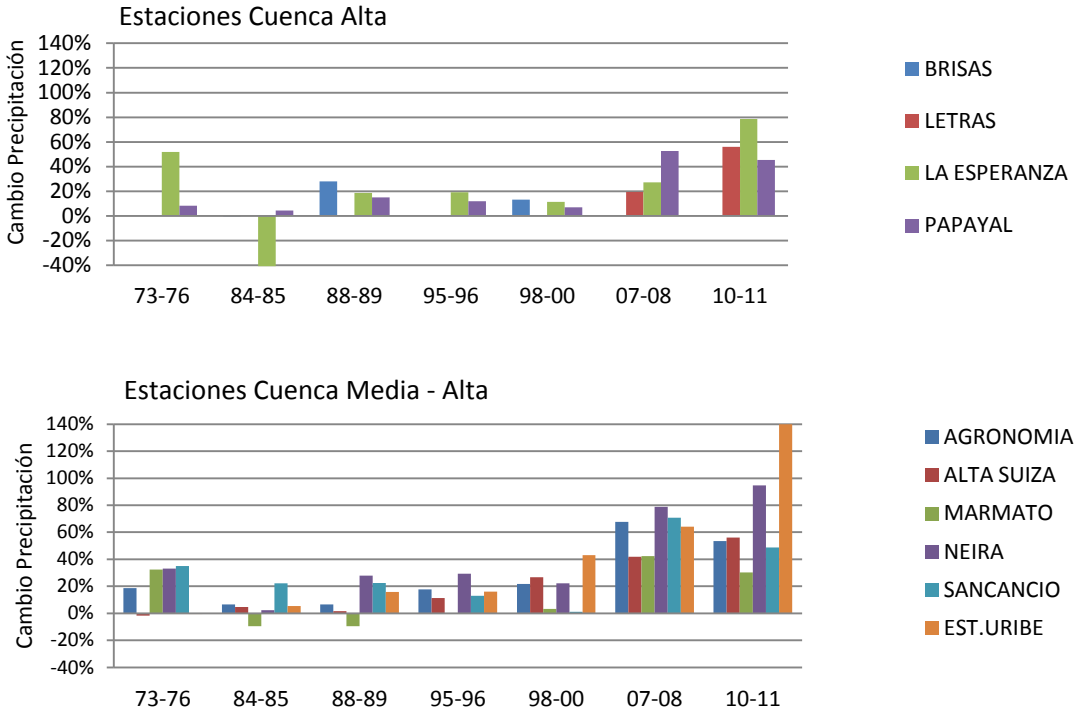
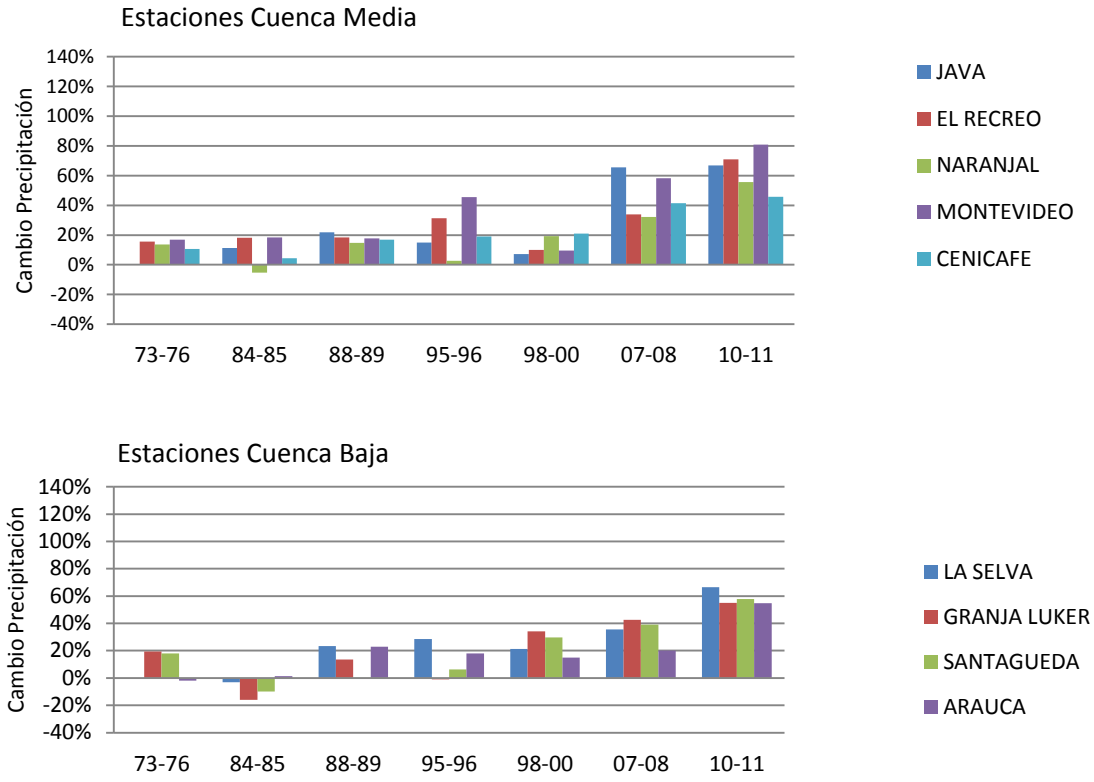


Figura 7.4: Cambios en la precipitación durante eventos fríos La Niña



Eventos cálidos El Niño. El cambio en la precipitación para los distintos episodios cálidos del Niño, se presenta en la Figura 7.5. Los eventos más intensos corresponden a los períodos 2009-2010 y 1991-1992, con reducciones en la lluvia en promedio del 26% y 30%, respectivamente.

Para el período 1981-2010, los valores consolidados de las anomalías estandarizadas promedio durante el fenómeno del Niño y La Niño se resumen en la Tabla 7.2, para las diferentes estaciones de la cuenca. Es importante anotar que para la cuenca alta el período de evaluación es más corto, según lo indicado en la Tabla 7.1. Para los eventos fríos, la anomalía estandarizada en las lluvias es 0.28±0,24 en la Cuenca alta, 0.44±0.24 en la media alta, 0.44±0.20 en la media y 0.46±0.22 en la cuenca baja. Durante los episodios cálidos, la anomalía en las lluvias es -0.30±0.12 en la cuenca alta, -0.39±0.12 en la media alta, -0.41±0.12 en la media y -0.40±0.13 en la baja.

Figura 7.5: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos El Niño

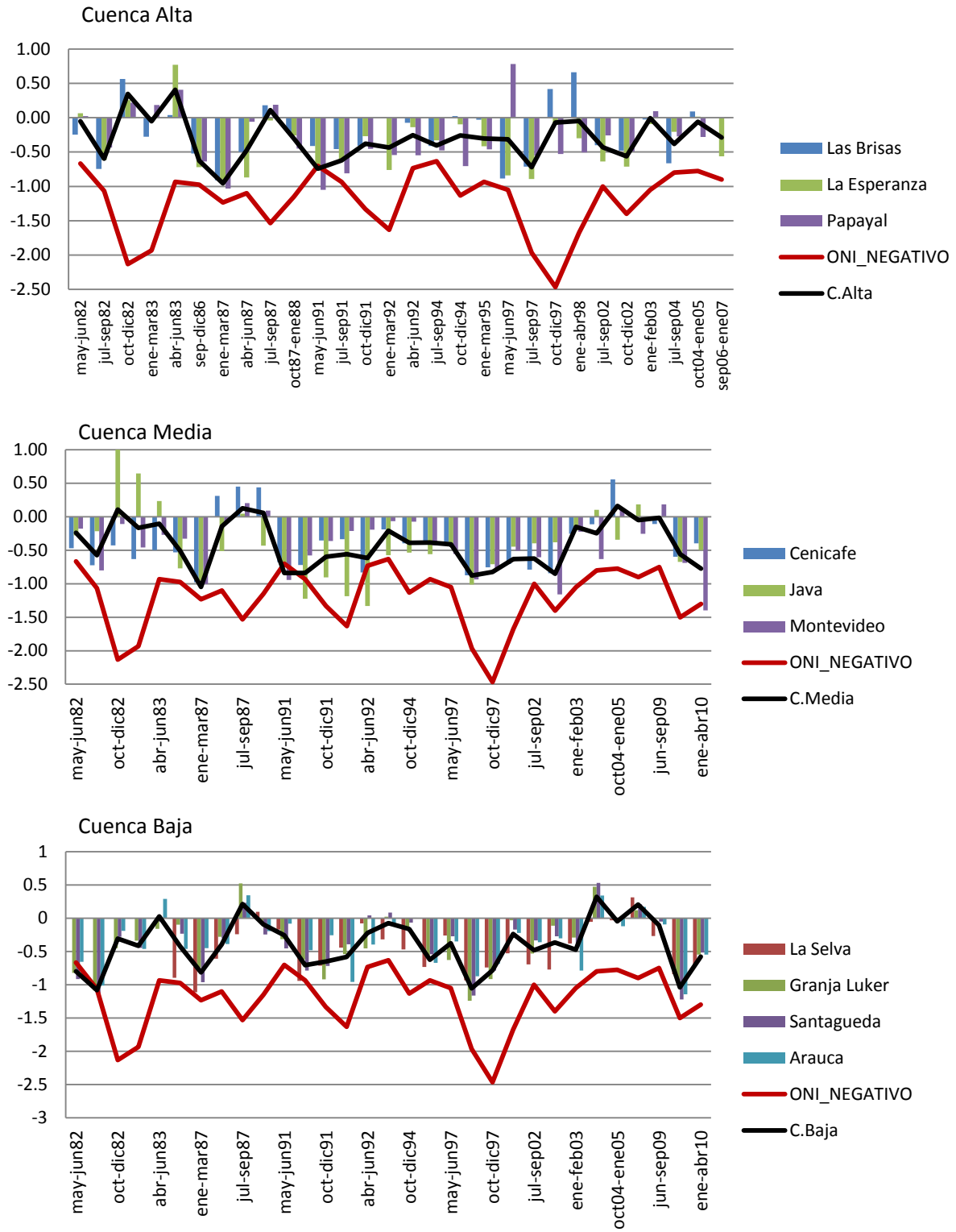
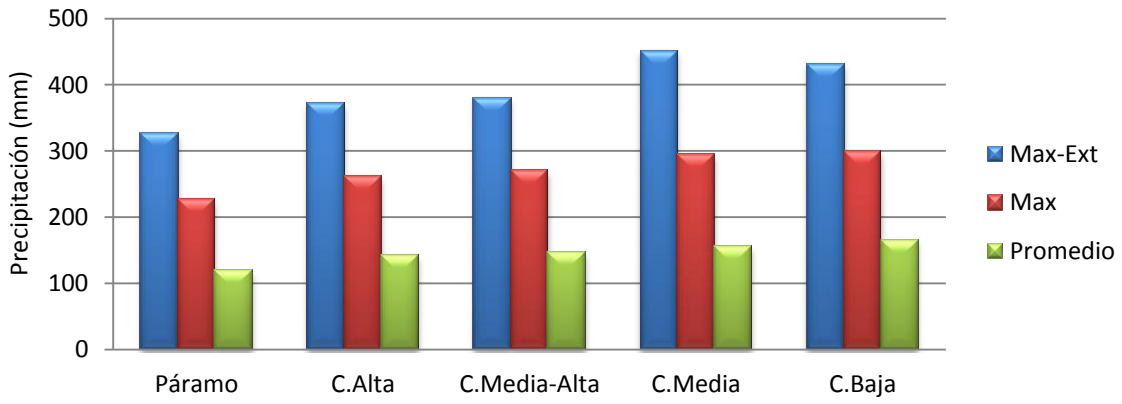


Tabla 7.2: Anomalía estandarizadas en la precipitación promedio 1981-2010 ENSO

Estación	Niña		Niño	
	Promedio	Intervalo confianza media 95%	Promedio	Intervalo confianza media 95%
Las Brisas	0.43	0.29	-0.24	0.16
La Esperanza	0.12	0.27	-0.36	0.16
Papayal	0.33	0.32	-0.31	0.16
Agronomía	0.47	0.27	-0.48	0.15
Alta Suiza	0.41	0.25	-0.36	0.17
Neira	0.50	0.27	-0.43	0.15
Marmato	0.35	0.26	-0.29	0.23
Planta Sancancio	0.40	0.24	-0.43	0.15
Estación Uribe	0.54	0.32	-0.28	0.18
Java	0.37	0.37	-0.41	0.15
El Recreo	0.51	0.19	-0.42	0.19
Montevideo	0.45	0.25	-0.43	0.15
La Selva	0.52	0.22	-0.48	0.15
Cenicafé	0.45	0.23	-0.39	0.15
Granja Luker	0.50	0.27	-0.38	0.16
Santágueda	0.42	0.28	-0.38	0.16
Arauca	0.44	0.23	-0.36	0.14

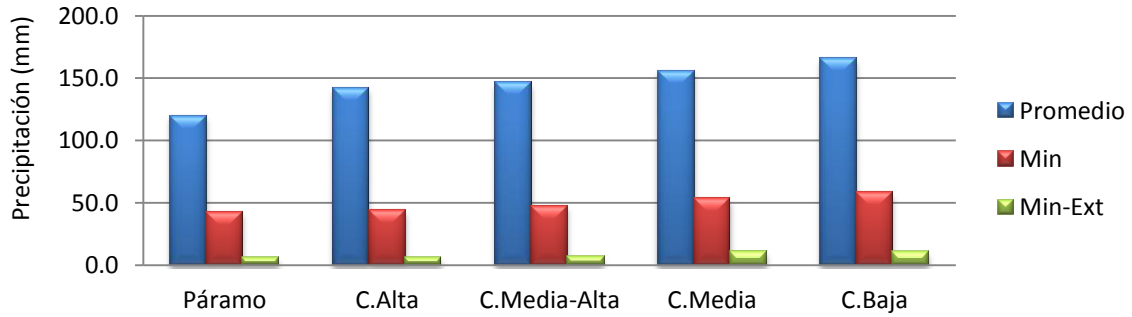
Precipitación Máxima. La precipitación mensual máxima, para el período 1981-2010, se consolida en la Figura 7.6. Con respecto a la precipitación media, se presenta un incremento del 85%, con los valores máximos y hasta de 168%, con los extremos.

Figura 7.6: Comportamiento precipitación mensual máxima



Precipitación Mínima. El análisis de la lluvia mensual mínima, para el período 1981-2010, se consolida en la Figura 7.7; comparando la precipitación media con la mínima, la disminución es de 66% y del 94% con los valores extremos.

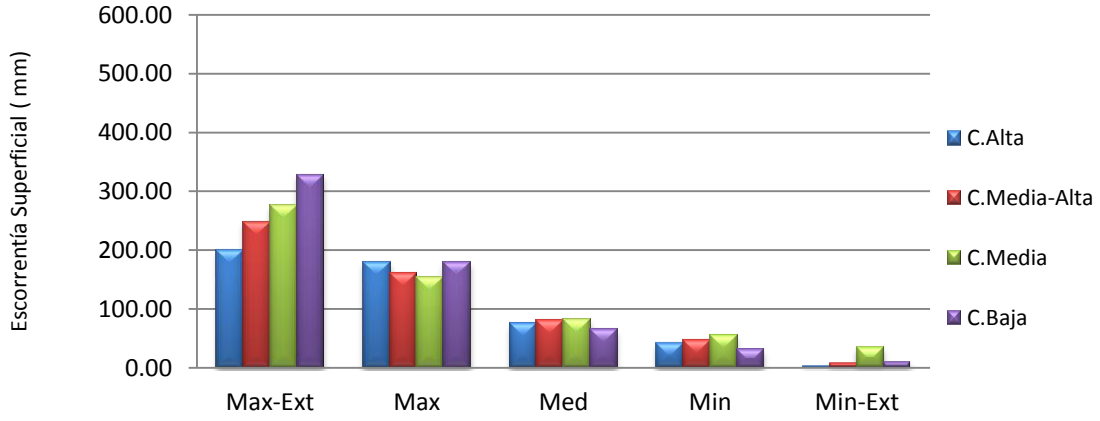
Figura 7.7: Comportamiento de la precipitación mensual mínima 1981-2010



7.3 Escorrentía superficial

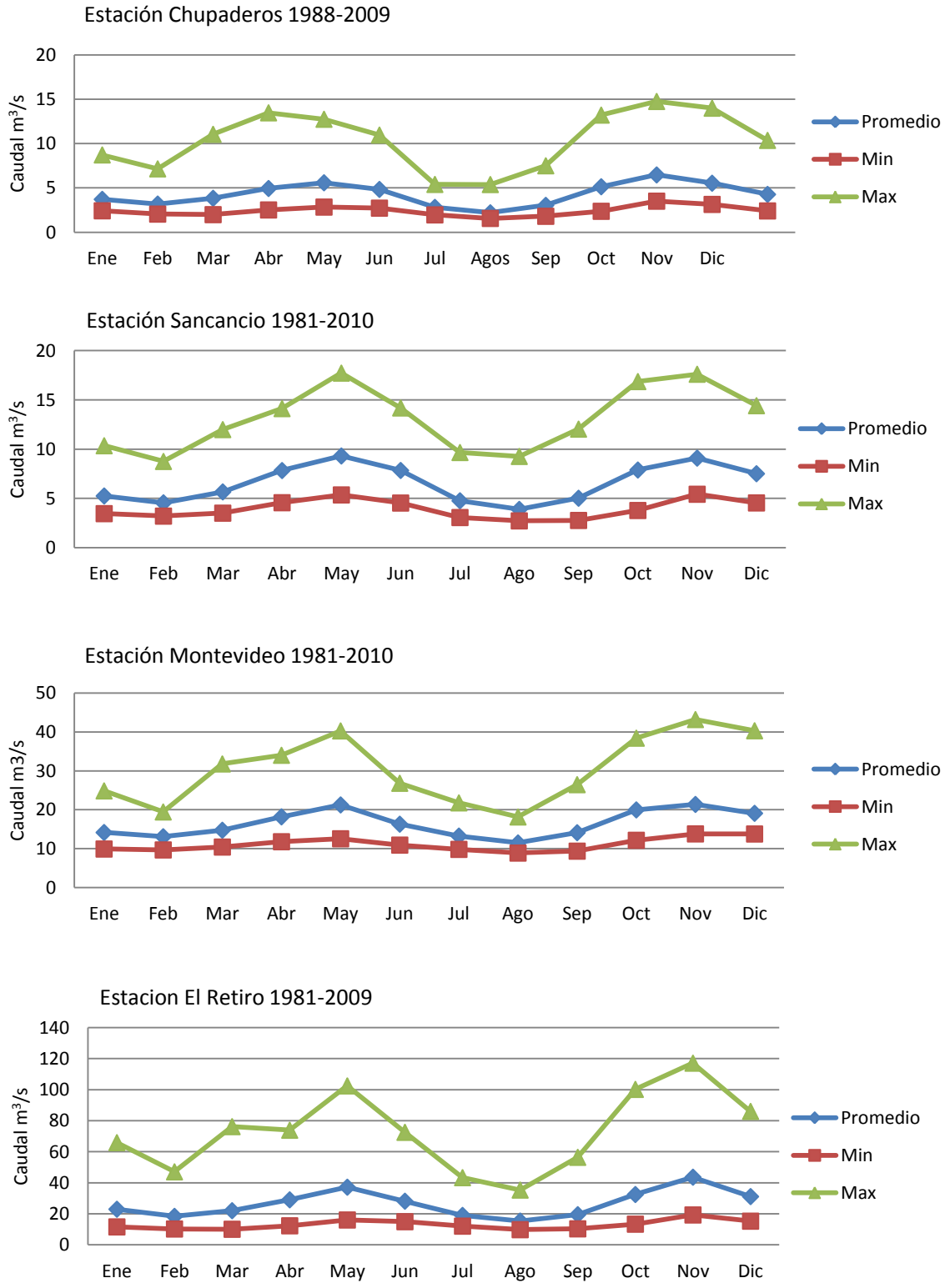
Para el período 1981-2010, el análisis de la escorrentía superficial, tomando como referencia los caudales observados, se presenta en la Figura 7.8. Con relación al promedio, el incremento es 126% con los máximos y 255% con los extremos. Para los mínimos la disminución promedio es 42% y 82% con los valores extremos.

Figura 7.8: Escorrentía superficial mensual río Chinchiná 1981-2010



En las estaciones de la cuenca la distribución del caudal mensual promedio, máximos y mínimos multianuales para el período más reciente se presenta en la Figura 7.9. En relación al caudal promedio, con los máximos el incremento promedio es del 137% en Chupaderos, 101% en Sancancio, 91% en Montevideo y 175% en el Retiro. Con los mínimos, la reducción promedio es del 45% en Chupaderos, 40% en Sancancio, 31% en Montevideo y 51% en el retiro. Por tanto, los efectos son más intensos en las cuencas alta y baja.

Figura 7.9: Comportamiento del caudal en las estaciones del río Chinchiná



Para evaluar el efecto del fenómeno ENSO en los caudales, se evalúan las anomalías estandarizadas de las series de caudales, se calculan los promedios trimestrales acumulados para compararlos con el índice oceánico el Niño, para el cual los valores inferiores a -0,5°C ocurren en episodios fríos- La Niña y los superiores a 0,5°C en eventos cálidos –El Niño. La evolución del comportamiento de las anomalías estandarizadas y el negativo del índice ONI se presenta en la Figura 7.10. Se observa una relación directa entre las variables y por tanto, inversa con ONI, como era de esperarse. Los coeficientes de correlación son 0.54 en la estación Chupaderos, 0.38 en Sancancio, 0.49 en Montevideo y 0.40 en el Retiro.

Figura 7.10: Evolución de las anomalías de los caudales medios y el ONI

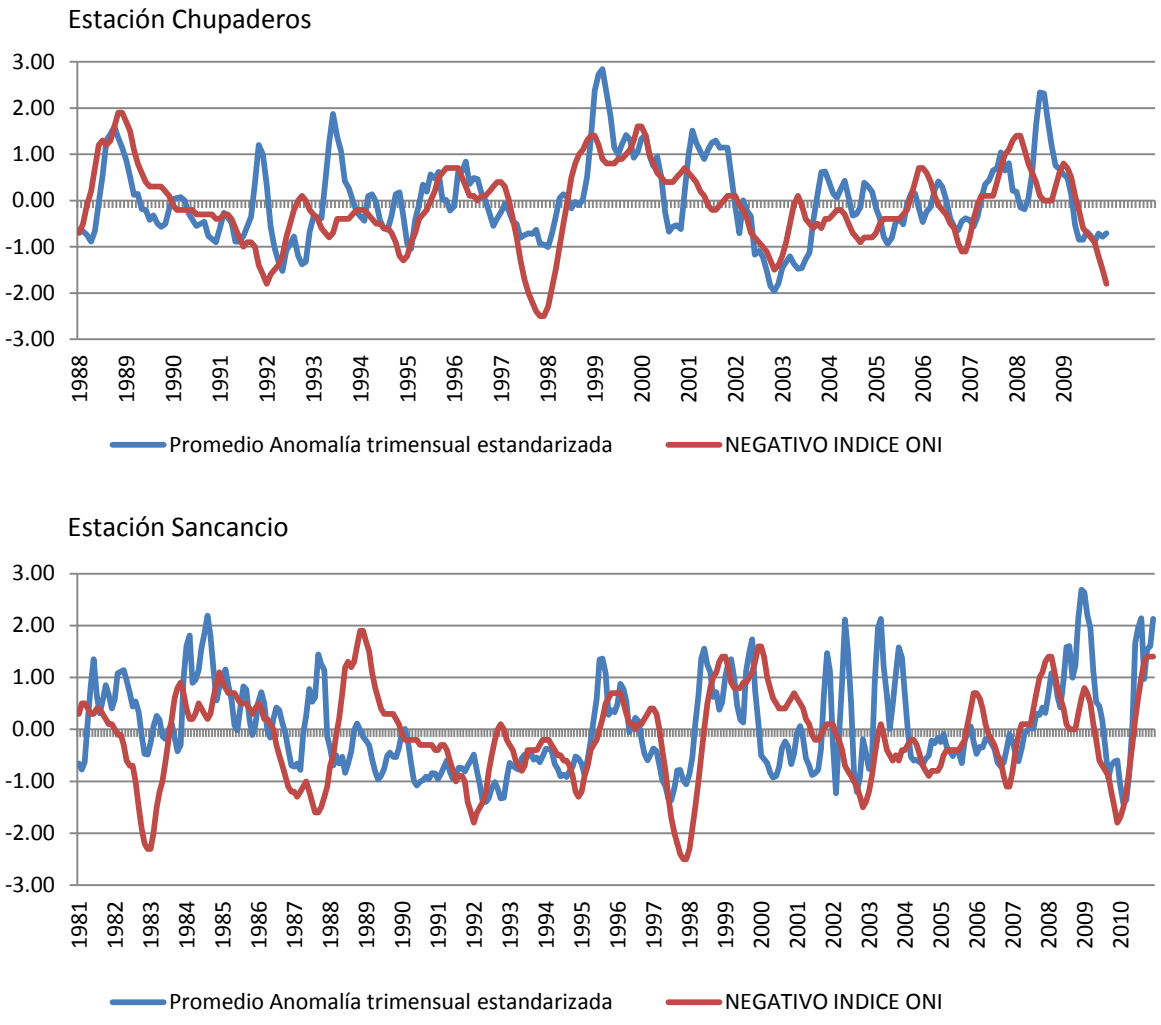
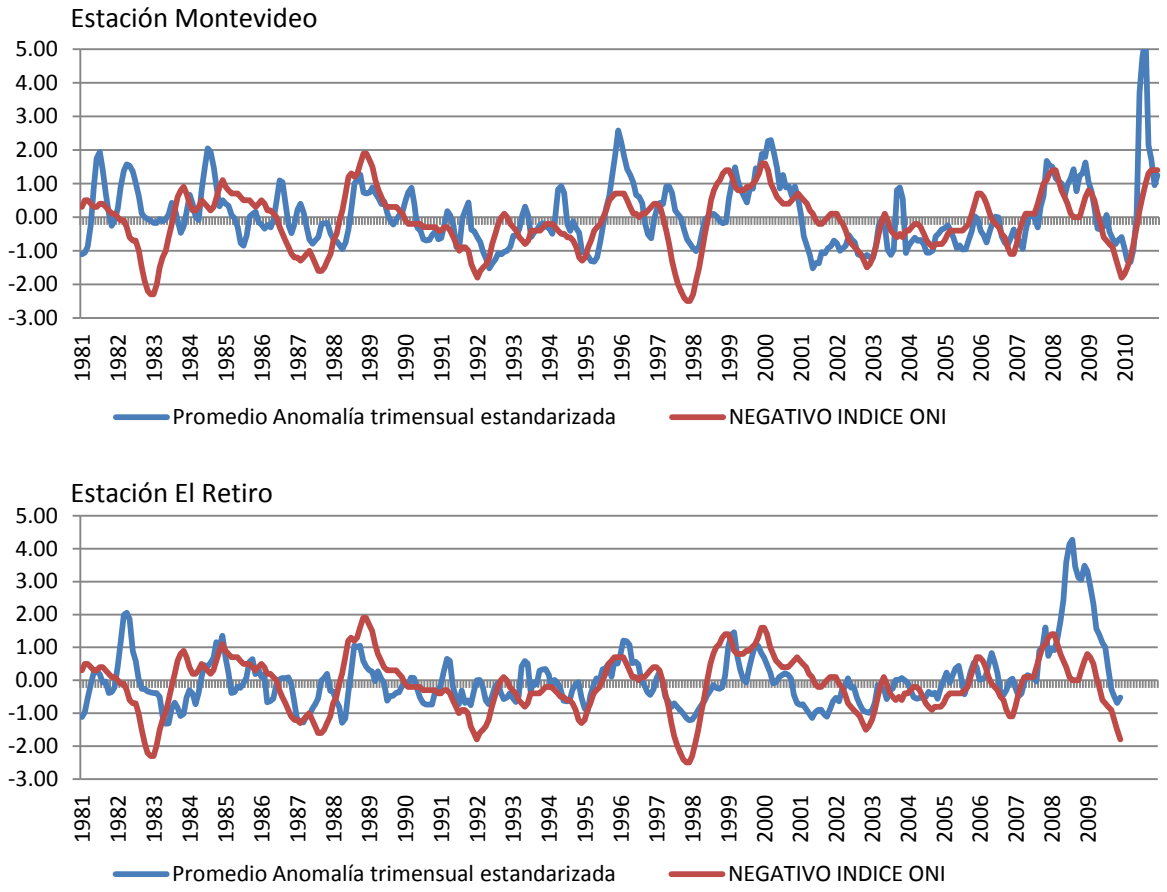


Figura 7.10: Evolución de las anomalías de los caudales medios y el ONI



Las alteraciones en el régimen hidrológico por el fenómeno de la Niña seleccionados de acuerdo con el índice ONI (menores a -0.5), se registran en la Figura 7.12. La anomalía promedio del caudal es 0.70±0.21 en la estación chupaderos; 0.46±0.19 en Sancancio; 0.90± 0.23 en Montevideo y 0.51±0.21 en El Retiro. Los cambios en el caudal por los eventos fríos- la Niña, con respecto al caudal multianual 1981-2010, en promedio son del 33% en la cuenca alta, en la media-alta del 9%, en la media del 22% y en la baja del 31%. Se reportan incrementos de caudal en las cuencas media y baja hasta del 80%.

Las anomalías estandarizadas en el caudal medio por efecto del fenómeno del Niño se observan en la Figura 7.12. La anomalía promedio del caudal es -0.52±0.17 en la estación chupaderos; -0.35±0.14 en Sancancio; -0.40± 0.12 en Montevideo y -0.40±0.11 en El Retiro. En la cuenca alta la reducción es 34% en promedio, con respecto al caudal multianual promedio del período 1981-2010; en la cuenca media-alta 25%; en la media 14% y en la baja 22%. Es mayor el efecto en la cuenca alta, con alteraciones hasta del 80%.

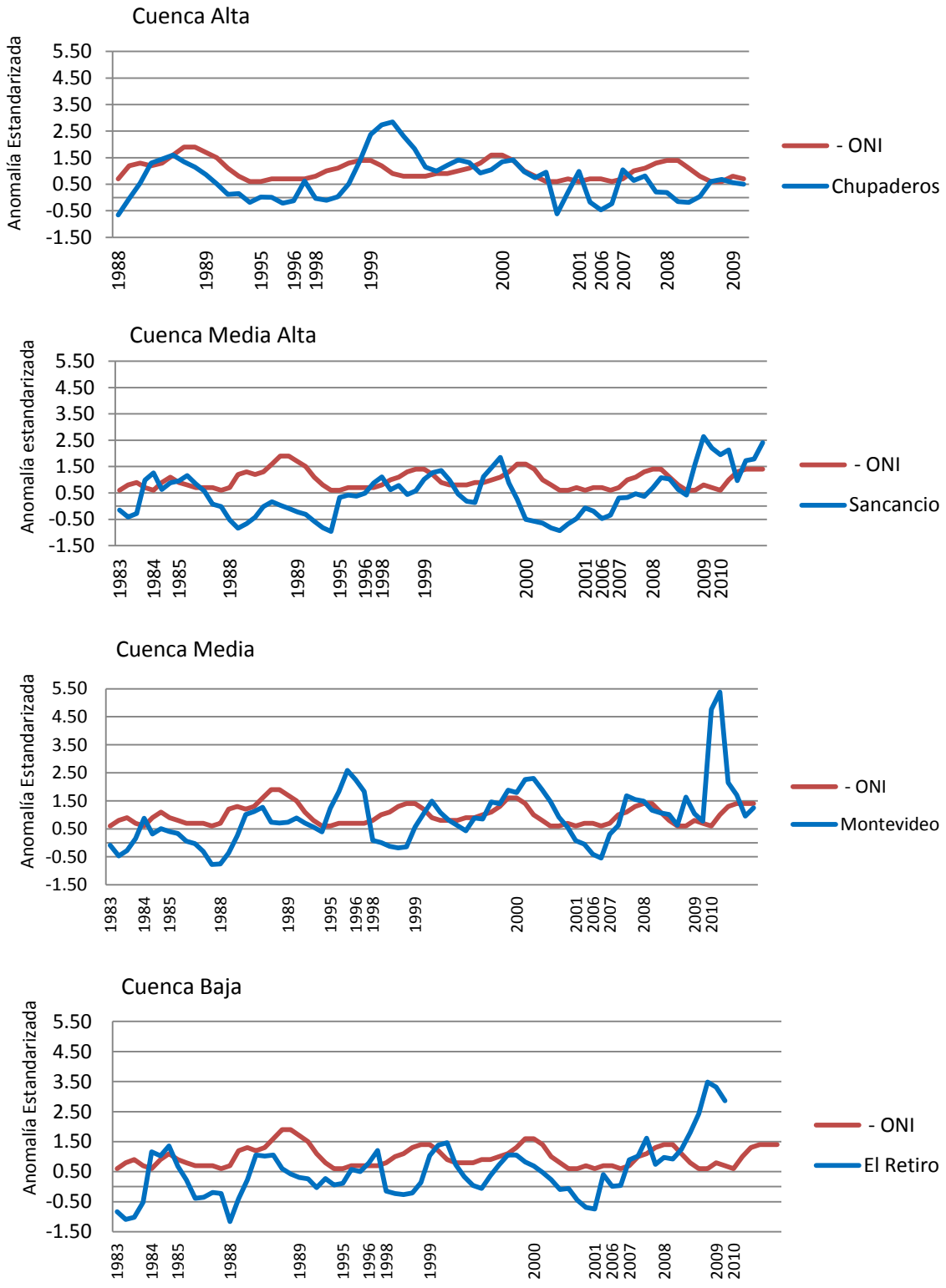



Figura 7.11: Alteración del caudal medio por eventos fríos La Niña