

1^{er} Ascenso.

(2001)

María Teresa

INFLUENCIA DE LAS VARIABLES MACROCLIMÁTICAS EN EL CLIMA DE VENEZUELA.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Índice General	i
Índice de Cuadros	iii
Índice de Figuras	iv
Índice de Anexos	vii
Resumen	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo General	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1. El Funcionamiento del Sistema Climático	6
3.1.1. Definiciones Básicas	6
3.1.2. Las Interacciones dentro del Sistema Climático	8
3.1.3. La Circulación General de la Atmósfera	15
3.2. La Variabilidad Climática	23
3.3. El Clima de Venezuela	25
3.3.1. Descripción General	25
3.3.2. Principales factores climáticos en Venezuela	29
3.4. Influencia de las Variables Macroclimáticas en el Clima de Venezuela	41
4. MATERIALES Y MÉTODOS	44
4.1. Obtención de los Registros Originales	44
4.1.1. Datos Climáticos de Venezuela	44
4.1.2. Variables Macroclimáticas	44
4.2. Procesamiento de los Registros Originales	45
4.2.1. Selección de las Estaciones y Período Común	45
4.2.2. Creación de Archivos de Precipitación y de Variables Macroclimáticas	46
4.2.3. Prueba de la bondad del software de interpolación SURFER	49
4.3. Análisis Estadísticos	50
4.3.1. Estadísticos Básicos de la Precipitación - Variabilidad	50
4.3.2. Selección y Análisis de Variables Macroclimáticas	52
4.3.3. Análisis de la Relación Espacial entre la Precipitación y las VM	53
4.3.4. Análisis de la Relación Temporal entre la Precipitación y las VM	54
4.3.5. Caracterización del Tipo de Influencia (Efectos) de las Variables Macroclimáticas sobre las Anomalías de Precipitación	55

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
1. Comparación de Medias y Varianzas de los valores anuales de Precipitación Promedio espacial para 3 períodos de registro	58
2. Resumen de la distribución de las estaciones pluviométricas utilizadas según la altura	59
3. Resumen de los archivos básicos de trabajo	61
4. Resumen de los períodos de registro analizados	62
5. Medias del número de estaciones en cada categoría de Anomalías clasificadas según según los terciles y según la desviación estándar (valores expresados en Porcentaje %) 87	87
6. Resumen de los meses con eventos generalizados de poca lluvia (el asterisco en los meses de la Clase 1 indica más de 60 % de estaciones)	89
7. Resumen de los meses con eventos generalizados de mucha lluvia (el asterisco en los meses de la Clase 4 indica más de 60 % de estaciones)	92
8. Resumen de "seguidillas" de meses con eventos extremos generalizados espacialmente según las clasificaciones por los terciles y la desviación estándar	93
9. Resumen de las Variables Macroclimáticas seleccionadas	97
10. Resumen de las principales Correlaciones Cruzadas entre Variables Macroclimáticas climáticas y lags para los que ocurren	100
11. Coeficientes de Correlación de los promedios anuales de Variables Macroclimáticas climáticas y los promedios espaciales de precipitación anual al norte y al sur del Orinoco	114
12. Valores del Coeficiente de Correlación (r) significativos al 5% y al 10% de probabilidad para diferentes números de pares de observaciones de las series	115
13. Ejemplos de Tablas de Contingencia 3x3 entre la lluvia de junio y la VM ATNOR para dos lags	127
14. Resumen de las tablas de contingencia 3x3 significativas al 0.1% para la clase de Lluvia -1 (escasa) según la clasificación por los terciles (Porcentajes de casos)	131
15. Resumen de las tablas de contingencia 3x3 significativas al 0.1% para la clase de Lluvia 1 (excesiva) según la clasificación por los terciles (Porcentajes de casos)	133
16. Resumen de asociaciones entre número de casos de meses secos y lluviosos según las Clases de VM	135
17. Síntesis del comportamiento decadal de la Lluvia y las VM más estables	136

	Pág.
5.3 Comparación entre la Precipitación Media Anual Digitalizada a partir de mapas a escala 1:250.000 dibujados tomando como base 900 estaciones pluviométricas, y la generada por el SURFER a partir de las 85 estaciones pluviométricas del estudio	60
5.4 Precipitación mediana para los períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, y 1969–1998 al sur del Orinoco)	64
5.5 Precipitación mediana para los períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, y 1969–1998 al sur del Orinoco) – Continuación	65
5.6 Rango Percentil P90% – P10% para los períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, y 1969–1998 al sur del Orinoco)	66
5.7 Rango Percentil P90% – P10% para los períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, y 1969–1998 al sur del Orinoco) – Continuación	67
5.8 Índice de Variabilidad para los períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, y 1969–1998 al sur del Orinoco)	68
5.9 Índice de Variabilidad para los períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, y 1969–1998 al sur del Orinoco) – Continuación	69
5.10 Promedios Espaciales del Total Anual de Precipitación media y coeficiente de variación (CV %) para diferentes períodos : decadales (10 años), Normales (30 años) y total (49 años) de 67 Estaciones al norte del Orinoco	76
5.11 Promedios Espaciales del Total Anual de Precipitación media y coeficiente de variación (CV %) para los períodos decadales (10 años) y total (30 años) de 18 estaciones al sur del Orinoco	76
5.12 Precipitación Promedio Anual (mm) para varios períodos decadales	78
5.13 Precipitación Promedio Anual (mm) para los períodos Normales, común y total	79
5.14 Diferencias Porcentuales de los promedios decadales de Precipitación respecto al período total. ene–mar	81
5.15 Diferencias Porcentuales de los promedios decadales de Precipitación respecto al período total. abr–jun	82
5.16 Diferencias Porcentuales de los promedios decadales de Precipitación respecto al período total. jul–sep	83
5.17 Diferencias Porcentuales de los promedios decadales de Precipitación respecto al período total. oct–dic	84
5.18 Distribución Temporal del Porcentaje de Estaciones en las clases "secas" de las Anomalías Clasificadas de Precipitación según los terciles y según la desviación estándar	88
5.19 Distribución Temporal del Porcentaje de Estaciones en las clases "lluviosas" de las Anomalías Clasificadas de Precipitación según los terciles y según la desviación Estándar	91

- 5.37 Transcurso anual de los coeficientes de correlación por mes entre las Anomalías de Precipitación y la VM Número de Manchas Solares (WOLF) para 5 lags 123

ÍNDICE DE ANEXOS

1. Lista de las Ochenta y Cinco (85) estaciones pluviométricas seleccionadas para el análisis de la relación entre la Precipitación y las Variables Macroclimáticas.
2. Estadísticos Básicos de los valores mensuales y anual de la Precipitación en el período total (1950–1998 al norte del Orinoco, 1969–1998 al sur del Orinoco). ["resumen1" en "anuales.xls". 13 tablas de 2 pág. c/u, total 26 páginas].
3. Estadísticos Básicos de los Promedios Espaciales de los valores mensuales y anual de la Precipitación para los diferentes períodos decadales y Normales. ["tabla" en "estadisticos1.xls". 1 tabla de 1 pág., total 1 página].
4. Número de Estaciones por clases de Precipitación y por mes (Clasificación en tres categorías según los terciles P33% y P66%). ["frec-abs3" en "frecuencias.xls". 1 tabla de 2 pág., total 2 páginas].
5. Frecuencia Relativa del Número de Estaciones por clases de Precipitación y por mes (Clasificación en tres categorías según los terciles P33% y P66%). ["frec-rel3" en "frecuencias.xls". 1 tabla de 2 pág., total 2 páginas].
6. Número de Estaciones por clases de Precipitación y por mes (Clasificación en cuatro categorías según la desviación estándar). ["frec-abs4" en "frecuencias.xls". 1 tabla de 2 pág., total 2 páginas].
7. Frecuencia Relativa del Número de Estaciones por clases de Precipitación y por mes (Clasificación en cuatro categorías según la desviación estándar). ["frec-rel4" en "frecuencias.xls". 1 tabla de 2 pág., total 2 páginas].
8. Coeficientes de correlación lineal entre las Variables Macroclimáticas. ["soloclima" en "rankano.xls". 1 tabla de 1 pág., total 1 página].
9. Gráficos de correlación cruzada para 24 lags entre Variables Macroclimáticas. [total 9 páginas].
10. Percentiles de las Variables Macroclimáticas. ["ptiles" en "percvariab.xls". 1 tabla de 2 pág., total 2 páginas].
11. Coeficientes de correlación entre las Anomalías de Precipitación y las Variables Macroclimáticas en las 67 estaciones al norte del Orinoco para el lag 0. ["largas" en "rankano.xls". 1 tabla de 6 pág., total 6 páginas].
12. Coeficientes de correlación entre las Anomalías de Precipitación y las Variables Macroclimáticas en las 18 estaciones al sur del Orinoco para el lag 0. ["cortas" en "rankano.xls". 1 tabla de 2 pág., total 2 páginas].
13. Coeficientes de correlación entre las Anomalías de Precipitación clasificadas en cuatro clases según la desviación estándar y las VM clasificadas según los terciles, para cada mes y para 5 lags. ["datos" en "gráficos.xls". 2 tablas de 1 pág. c/u, total 2 páginas].

ABSTRACT

An adequate knowledge of climate is necessary to incorporate the risk estimation in strategic planification, to optimize activities and to minimize negatives impacts. Because "climates" resulting from interactions inside the Climate System, it was researched if some Macroclimatic Variables (MV) (ocean temperature, pressure champs, high altitude winds champs and solar spots) have influence over the quantity of precipitation in Venezuela; in the affirmative, our climate could be better understood, and empirical relationships to predict precipitation could be established. First, precipitation was analized in three aspects : a) space-temporal distribution of long term periods statistics; b) space-temporal distribution of decadal variability (10 years); c) spacial concentration of extreme precipitations (low/excesive). Second, it was described the MV behavior and some of their interactions, and it was related to decadal variability of rain. Third, it was analized the spacial distribution of rain-MV correlation coeficients, which give evidence of a diferencial influence in the space. Fourth, it was analized the seasonal variation of the rain-MV correlation coeficients, which indicates temporal changes in the MV influences. Finally, using cross tabulation, it was analized if the MV and rain interact in similar way in the all values range or not; it is demonstrate that are the extremes values, both MV and rain, thar are more frecuently related. It was concluded it is possible to develop empirical relations to predict precipitation.

Key Words : Precipitation, Variability, Climate System, Venezuela, "El Niño".

1. INTRODUCCIÓN

El clima es, de todas las características que componen el ambiente de nuestro planeta, uno de los mayores condicionantes de las actividades humanas, ya que influencia a todos los sectores económicos; es el factor determinante para el sector primario (producción), y tiene también gran impacto en los sectores secundario (transformación) y terciario (servicios). Parte del éxito del hombre como especie consiste en que es capaz de organizarse socialmente en una gran diversidad de condiciones climáticas, tan extremas como polares, desiertos o selvas tropicales.

Un conocimiento adecuado de las condiciones climáticas es una herramienta fundamental para lograr una organización y un uso sostenible y eficiente de los recursos suelo y agua, y para las actividades productivas. A pesar de ello, nuestro conocimiento de las condiciones climáticas del país es bastante somero; parte del problema es que, en general, aún se maneja el concepto de clima como "las condiciones promedio atmosféricas", mientras que el concepto actual añade tres palabras clave : "las condiciones atmosféricas promedio ***incluyendo su variabilidad***". Ese aparentemente simple añadido al concepto de clima representa en realidad un cambio cualitativo, que ha permitido un avance espectacular de la Climatología, tanto en investigación como en aplicaciones prácticas, en los últimos 25 años en los países desarrollados; bajo esa nueva visión, es factible optimizar la planificación estratégica, así como la operativa, dado que al considerar la incertidumbre se está considerando el riesgo, por lo que los sistemas y/o acciones que se planifican son flexibles para adaptarse a esta situación. Adicionalmente, el nuevo concepto abrió la puerta del pronóstico climático, que en pocos años será completamente operativo, con hasta un año de antelación; ya existen pronósticos de este tipo en Internet, en las hojas Web de centros de investigación como la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA – Website : <http://www.noaa.gov>).

En términos de una política eficiente para gestión de los recursos hídricos, la agricultura y problemas como la sequía, es imprescindible considerar que ***si la norma es la variabilidad climática, entonces la disponibilidad de agua y los rendimientos agrícolas son también variables***; la variabilidad climática introduce cambios significativos en la respuesta de los sistemas físicos y socioeconómicos, por lo que estos últimos deberían ser organizados de modo flexible para poder responder a los cambios por exceso y por defecto más eficientemente, y usar los recursos de modo sostenible (Gibbs *et al*, 1978; Makarau, 1992).

Al considerar a la variabilidad parte intrínseca del clima, comenzó una fuerte corriente de investigación en climatología dinámica (termodinámica e hidrodinámica), que ya había sido propuesta por Bergeron en 1930 (Stringer, 1972), para comprender y luego predecir mejor dicha variabilidad, aunque sólo a inicios de los años 70 se comenzó a trabajar sistemáticamente en este campo. Fue alrededor de esa época cuando se dispuso de datos satelitales, que fueron vitales por ofrecer una visión de conjunto de grandes áreas a intervalos de tiempo muy cortos, y al mismo tiempo, comenzó a masificarse el uso de las computadoras personales, que permitió el análisis de las ingentes cantidades de datos involucrados.

Al nivel internacional este tipo de análisis se ha realizado fundamentalmente usando técnicas estadísticas, desde correlaciones múltiples a diferentes tipos de análisis multivariado, y con series de tiempo. El modo general de trabajo consiste en seleccionar elementos de algunos de los subsistemas (estos elementos son también llamados Variables Macroclimáticas) y estudiar su relación con los elementos climáticos temperatura y precipitación, a diferentes escalas espaciales. Son precisamente estas relaciones las que sientan las bases para la predicción del clima (WMO, 1999).

Por supuesto, para establecer relaciones entre los subsistemas debe contarse con un conjunto balanceado de datos, tanto al nivel temporal como espacial; por esta razón, la inmensa mayoría de los trabajos hasta ahora han utilizado el subsistema de los océanos, no sólo porque es físicamente el de mayor influencia (aunque no el único) a través del ciclo del ENOS (El Niño–Oscilación del Sur) sino también porque se ha desarrollado todo un conjunto de mediciones satelitales para las Variables Macroclimáticas temperatura y nivel del mar, lo que permite una equivalencia razonable con la disponibilidad de datos climáticos.

De este modo, aunque no se tenga el conocimiento científico preciso de cómo y por qué están ocurriendo los fenómenos, se tiene un elemento predictivo, ya que las observaciones muestran que “los climas” en ciertos lugares, responden aproximadamente de la misma forma la mayoría de las veces ante anomalías similares de la temperatura del océano. La importancia práctica de contar con tales pronósticos, en términos de toma de decisiones estratégicas, es enorme. La utilidad de los métodos empíricos de predicción climática, pasa por conocer bien la respuesta de “los climas”, es decir, su reacción ante los diversos tipos de anomalías (WMO, 1999).

Hastenrath (1986) resume en cinco tipos los enfoques para lograr la predicción climática :

- extrapolación del comportamiento de las series de tiempo de los elementos climáticos;
- métodos puramente estadísticos (correlaciones entre el comportamiento de los elementos climáticos y las Variables Macroclimáticas);
- persistencia estacional de la precipitación (sólo funciona en algunas áreas);
- combinación de métodos estadísticos con investigaciones diagnósticas de la variabilidad interanual de los patrones de circulación;
- modelos numéricos (Modelos en dos dimensiones, Modelos acoplados Atmósfera-Océano, Modelos de Circulación Global, entre otros).

Estas vías de análisis no son mutuamente excluyentes, y de hecho en muchos casos se utilizan combinaciones de ellas, por ejemplo, los métodos estadísticos para obtener condiciones de borde

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Determinar si el comportamiento espacio-temporal de la precipitación en Venezuela presenta relación con el comportamiento de un grupo de Variables Macroclimáticas representativas de los subsistemas oceánico y atmosférico.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la distribución de la precipitación en el país, tanto los valores promedios como su variabilidad temporal, a los niveles estacional, interanual y decadal.
- Determinar si las Variables Macroclimáticas influyen a la precipitación del país de manera diferencial en el espacio.
- Determinar si las Variables Macroclimáticas influyen a la precipitación del país de manera diferencial en el tiempo (niveles estacional, interanual y decadal).
- Determinar si las Variables Macroclimáticas influyen de modo uniforme a la precipitación, o son sus valores extremos los que actúan sobre la lluvia.
- Determinar si la precipitación se ve afectada por las Variables Macroclimáticas de modo uniforme, o son los valores extremos de lluvia los que se ven más afectados.
- Determinar si la influencia de las Variables Macroclimáticas sobre la precipitación se presenta con varios meses de antelación (-4, -3, -2, -1) o se manifiesta sólo en el mismo mes.

De cubrir los objetivos específicos, se espera poder concluir si es posible llegar en un futuro cercano a disponer de elementos de pronóstico estacional de la precipitación con varios meses de antelación. Se espera también que los resultados del presente trabajo sirvan de base para dar los pasos siguientes : explicar cómo y por qué ciertas Variables Macroclimáticas influyen a la precipitación en Venezuela y evaluar algunas relaciones estadísticas que permitan pronosticar la precipitación con base a dichas Variables Macroclimáticas. Asimismo, se espera que con base a los resultados puedan definirse futuras líneas de investigación que contribuyan a mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento del clima del país, y en consecuencia a aumentar la utilidad práctica de la información hidroclimática para todo tipo de usuarios.

discontinuidad en su altura. En las dos zonas de máxima discontinuidad, se ubican también dos zonas de vientos máximos en altura, aproximadamente a los 50° N por el lado polar y a los 35° N por el lado ecuatorial, conocidos por *Jet-Stream*, el polar y el subtropical.

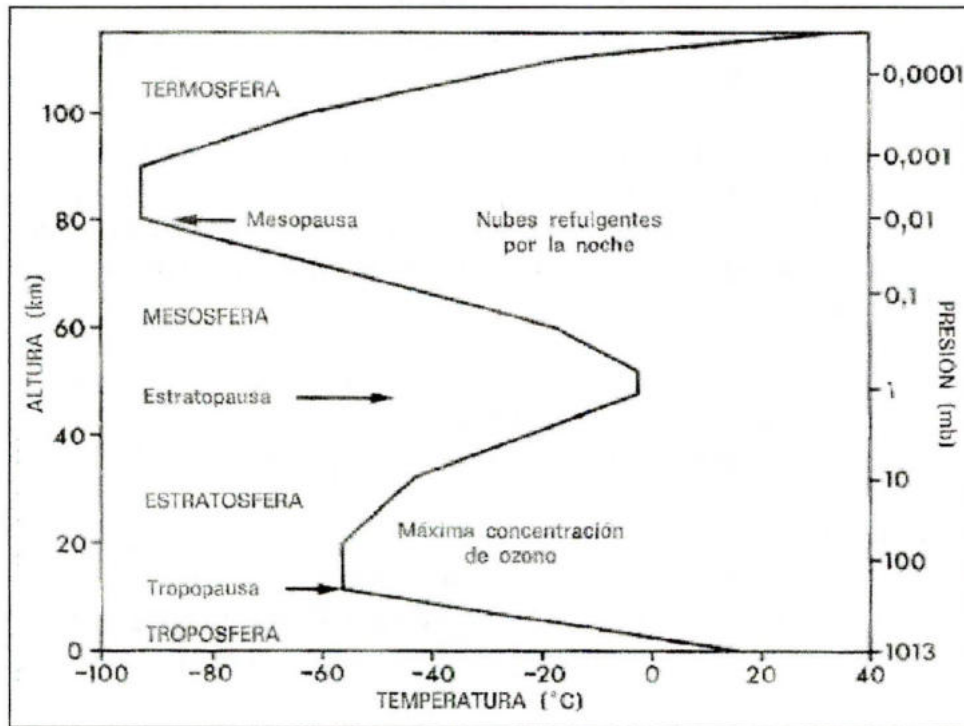


Figura 3.1. Estructura vertical de la atmósfera. Fuente : Barry y Chorley, 1985.

- Estratósfera : segunda capa de la atmósfera, caracterizada por un incremento de la temperatura con la altura y que se extiende desde la Tropopausa hasta unos 50 km de altura, conteniendo 10–20% de la masa total de la atmósfera; controla la radiación de onda muy corta (ultravioleta) que llega a la Tierra vía el proceso de absorción por la *Capa de Ozono*, área de máxima concentración de ese gas situada a unos 25 km de altura, y la radiación saliente de onda larga del planeta; en la parte inferior de la Estratósfera, a unos 20–22 km de altura, se produce una alternancia cíclica (unos 26 meses) de vientos del este (E) y del oeste (W), de la que aún no se conocen sus causas. Como la parte alta de la Tropósfera, la Estratósfera inferior está más caliente sobre el Polo que sobre el Ecuador. Actualmente la comunidad científica estudia aceleradamente el comportamiento de la Estratósfera, ya que se supone que su papel en el Sistema Climático es grande – vía la oscilación del campo de vientos en altura y la propagación de ondas hacia abajo – y además con relación al Cambio Climático. Si la Tropósfera está aumentando su temperatura global, la Estratósfera debería disminuir su temperatura global (es decir, aumentar la tasa de emisión de radiación infrarroja para equilibrar al sistema), con lo que se estaría incrementando el gradiente vertical de temperatura entre

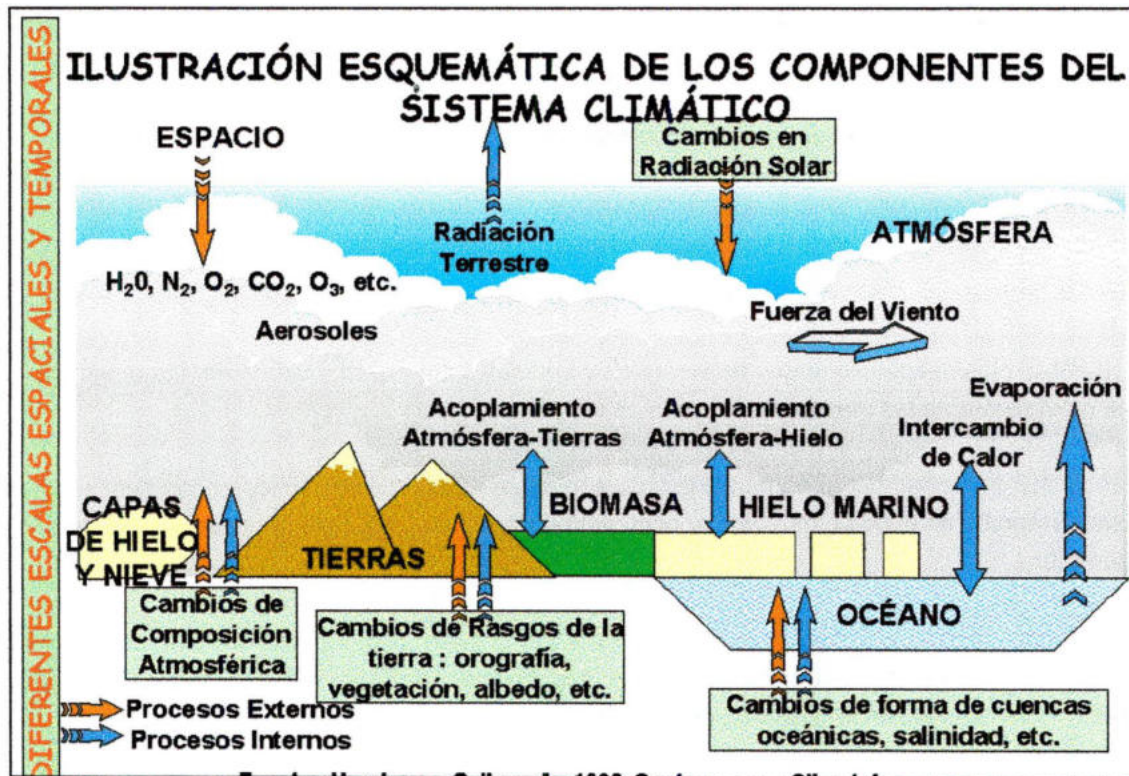


Figura 3.2 Fuente : Modificado de OMM, 1990.

Por ejemplo, dentro del ciclo hidrológico y considerando un solo evento de lluvia en un lugar específico, la lluvia representa la salida de materia del depósito "atmósfera" y la entrada para el depósito "suelo", mientras que la evaporación es la salida de materia del depósito "suelo" y la entrada para el depósito "atmósfera"; ambos procesos (precipitación y evaporación) están regulados por propiedades de los depósitos en sí mismos (contenido de humedad, temperatura, estabilidad atmosférica, contenido de aerosoles, mezcla turbulenta en la atmósfera y características físicas del suelo), pero también en cierta medida por factores externos, como el aporte de agua subsuperficial hacia el lugar desde otros sitios. En esta transferencia de materia entre los dos depósitos está involucrada también la transferencia de energía en forma de calores latentes de evaporación y condensación.

Lockwood (1979) considera en forma muy simplificada los subsistemas atmosférico y oceánico como una cascada de energía donde la radiación (fuente externa) se convierte en calor (calentamiento del agua que luego calienta al aire, evaporación del agua que va como calor latente al aire), que a su vez se transforma en energía cinética (movimiento de las corrientes marinas y viento generado por gradientes horizontales de temperatura que a su vez generan gradientes horizontales de presión); el movimiento es paulatinamente destruido por las fuerzas de fricción, que lo convierten en calor "degradado" que se pierde hacia el espacio en forma de radiación infrarroja. En un balance neto para la Tierra como un todo, y en promedio anual, la ganancia de energía

El agente “**director**” es la desigual cantidad de energía que llega desde el sol a cada punto de la Tierra en cada momento del año. Esto ocurre porque la Tierra es redonda y una superficie curva no recibe igual cantidad de energía en dos puntos consecutivos, y porque la Tierra gira alrededor del sol en una elipse que está inclinada respecto al plano del ecuador solar, lo cual implica que en una época del año se recibe mayor cantidad de energía en un hemisferio, es decir se está en “verano”, mientras que en el hemisferio contrario se está en “invierno”. La situación se invierte cuando la Tierra, 6 meses más tarde, está en el lado opuesto de su órbita alrededor del sol. Como consecuencia de la redondez de la Tierra, de su movimiento de traslación y del relativamente pequeño ángulo de inclinación de la eclíptica (23,5°), en las bajas latitudes (Ecuador) se recibe más energía que en las altas latitudes (Polos), creando un desbalance energético permanente que origina un desbalance también permanente de temperaturas y presiones atmosféricas, por lo que el sistema global “reacciona” poniendo en marcha la circulación general de la atmósfera y los océanos para tratar de encontrar el equilibrio. Se han hecho estimaciones que muestran que en ausencia de radiación solar, la fricción haría cesar todo el movimiento atmosférico en aproximadamente una semana (Barry y Chorley, 1985).

Los dos agentes “**modificadores**” de los procesos del Sistema Climático son :

- a) el movimiento de rotación de la Tierra; el hecho de que la Tierra rote sobre su eje introduce variaciones en lo que, de no existir esta rotación, sería un movimiento meridional (norte-sur) desde las Altas Presiones polares hacia las Bajas Presiones ecuatoriales; las principales modificaciones que introduce la rotación son dos :
 - ✓ en primer lugar, las producidas por la Fuerza de Coriolis, que desvía las trayectorias hacia la derecha en el Hemisferio norte, quedando como resultado que los movimientos del aire y las corrientes oceánicas tienen una dirección predominantemente zonal (este-oeste);
 - ✓ en segundo lugar, la aparición de la *vorticidad* : un fluido en rotación tiende a generar remolinos (vórtices) que modifican la distribución tanto vertical como horizontal del intercambio de calor y de momento angular;
- b) la distribución y forma de las masas marinas y continentales; actúa al menos en tres aspectos :
 - ✓ el efecto de *continentalidad* es importante en la distribución horizontal de áreas con grandes y pequeños gradientes térmicos, lo cual influencia los movimientos horizontales y verticales del viento vía su influencia en el campo de presiones;
 - ✓ en segundo lugar, la posición de los continentes; estudios paleoclimáticos señalan que con posiciones distintas, especialmente de la Antártida, la dinámica atmosférica y de corrientes marinas cambia significativamente, y en consecuencia cambia también la distribución espacial de los “climas” en el sentido geográfico del término;
 - ✓ finalmente, las grandes cordilleras (Andes, Rocosas, Himalaya) influyen la circulación de la alta Tropósfera, especialmente la posición de las Ondas de Rossby (ver *infra* 3.1.3).

Dado que el Sistema Climático está en una permanente búsqueda del equilibrio a través de las interacciones entre sus componentes, existe una variabilidad intrínseca, y existe una enorme

- **Procesos Dinámicos** : los movimientos de masa y energía al nivel global y a mesoescala, especialmente los transportes meridionales y verticales de calor latente, calor sensible y momento (incluye las interrelaciones con el transporte de energía por los océanos).
- **Procesos de Superficie** : interrelaciones en el intercambio de radiación (ondas cortas y largas), calor latente, calor sensible y momento angular, entre las superficies agua–tierra–hielo y la atmósfera, incluyendo los reguladores como el albedo, la emisividad y la rugosidad.
- **"Feed-backs"** : retroalimentaciones entre los procesos radiativos, dinámicos y de superficie.

El aspecto de los Feed-backs merece ciertos comentarios; aún se desconoce en gran medida cómo funcionan muchos de ellos, así como la magnitud de sus efectos, aunque se sabe que en general las respuestas que producen son no lineales. Algunos Feed-backs son positivos, es decir, al producirse un cambio en uno de los elementos se refuerza la situación original, mientras que otros son negativos (se debilita y/o invierte la situación original). La mayoría de los Feed-backs que se manejan con relativa confianza se refieren a su efecto sobre la temperatura del aire, pero para la precipitación la situación es más complicada, dado que es más difícil cuantificar el efecto. En este caso, el más importante de los Feed-backs es el del vapor de agua, que a través de su efecto sobre otros componentes se estima que al menos duplicaría el efecto de calentamiento directo que ya ejerce el vapor de agua como gas de efecto invernadero y además potencia el efecto de otros Feed-backs, como el de las nubes y el de hielo–nieve (IPCC, 2000 c). Entre los principales Feed-backs que se manejan actualmente están (IPCC, 2000 c, Henderson-Sellers y Robinson, 1984) :

- **Superficies de Hielo y Nieve – Albedo** : es un Feed-back positivo, es decir, si por alguna razón comienza a disminuir la temperatura habrá más nieve y hielo, afectando el balance de radiación de onda corta, ya que por su alto albedo¹ aumentarán las pérdidas por reflexión y habrá menos radiación neta, lo que implica menos disponibilidad de calor sensible de la superficie para calentar al aire, lo que implica que la temperatura seguirá disminuyendo.
- **Nubes – Albedo – Absorción** : la nubosidad es uno de los elementos que provocan Feed-backs más complicados, ya que es positivo desde el punto de vista de la reflexión de onda corta (trabaja como el de hielo–nieve), pero es negativo desde el punto de vista de la absorción de onda larga : el agua líquida de las nubes funciona como gas de efecto invernadero, por lo que a medida que aumente la nubosidad habrá menos pérdidas radiativas de infrarrojo y en consecuencia menor enfriamiento. No se conoce con certeza cuál de los efectos (positivo o negativo) pueda ser mayor, ni tampoco si de alguna manera se compensan, ya que además depende del tipo de nubes (sí son de hielo o de agua, sí son estratos o cúmulos, de su nivel de agrupamiento en el caso de los cúmulos, de su cantidad total, etc.).

¹ Con relación al albedo del hielo hay discusión; algunos autores sostienen que tiene un albedo relativamente bajo, menor a 50% (Rosenberg, 1974), mientras otros le asignan valores altos de 50-70% (Petterssen, 1976).

utilizado en los estudios sobre su influencia en el Sistema Climático es el Número de Wolf, que mide la actividad del ciclo de las manchas solares.

Para estudiar el complejo funcionamiento del Sistema Climático se han creado una serie de programas al nivel global, liderizados por varios organismos de las Naciones Unidas. Entre los principales destacan (OMM, 2000) :

- La Organización Meteorológica Mundial (OMM) con el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC); éste incluye estudios y experimentos que desarrollan actividades al nivel regional, entre ellos : el Estudio de la Variabilidad y Predictibilidad del Clima (CLIVAR), el Experimento Mundial sobre Energía y el Ciclo Hidrológico (GEWEX) y el Proyecto Experimental de Despliegue de Boyas Fondeadas para la Investigación en el Atlántico Tropical (PIRATA).
- El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con el Programa Mundial de Evaluación del Impacto del Clima y Estrategias de Respuesta (PMEICER).
- La UNESCO con el Programa Internacional Geósfera–Biósfera (PIGB).

3.1.3. La Circulación General de la Atmósfera

Se entiende por Circulación General de la atmósfera el conjunto de movimientos del aire a escalas planetaria y sinóptica, y cuya función principal en el Sistema Climático es tratar de compensar las desigualdades en la cantidad de energía que se recibe en superficie a través de la redistribución del calor latente, el calor sensible y el momento angular (Barry y Chorley, 1985; Cuadrat y Pita, 2000; IPCC, 2000 a).

Cuando se considera cómo se distribuyen tanto la energía que llega del sol (onda corta) como la energía que emiten todas los objetos en la Tierra, incluyendo a cada una de las moléculas de gases en la atmósfera (onda larga), se puede considerar dos tipos de balance, que generan una cantidad de Radiación Neta (RN) (Rosenberg, 1974) :

$$a) \text{ Balance Radiativo : } RN = \text{Onda Corta } \Downarrow + \text{Onda Larga } \Downarrow - \text{Onda Corta } \Uparrow - \text{Onda Larga } \Uparrow$$

donde : Onda Corta \Downarrow = onda corta entrante a una superficie desde el sol

Onda Larga \Downarrow = onda larga entrante a una superficie desde la atmósfera

Onda Corta \Uparrow = onda corta saliente de una superficie por reflexión

Onda Larga \Uparrow = onda larga saliente de una superficie por emisión

y esa RN, es decir, esa *capacidad de hacer trabajo*, realiza las siguientes funciones :

$$b) \text{ Balance Calórico : } RN = \text{Calor Sensible} + \text{Calor Latente} + \text{Calor de Conducción} + \text{Fotosíntesis}$$

donde : Calor Sensible (H) calienta la atmósfera por convección a partir de las superficies.

Calor Latente (LE) es el usado para evaporar el agua.

Calor de Conducción (G) calienta las superficies (océanos y continentes).

Fotosíntesis generalmente no se considera por representar < 1% de la RN.

3.4, ya que como se explicó anteriormente la Tropósfera ecuatorial tiene casi el doble de altura que la Tropósfera polar para repartir el mismo 75% de masa atmosférica :

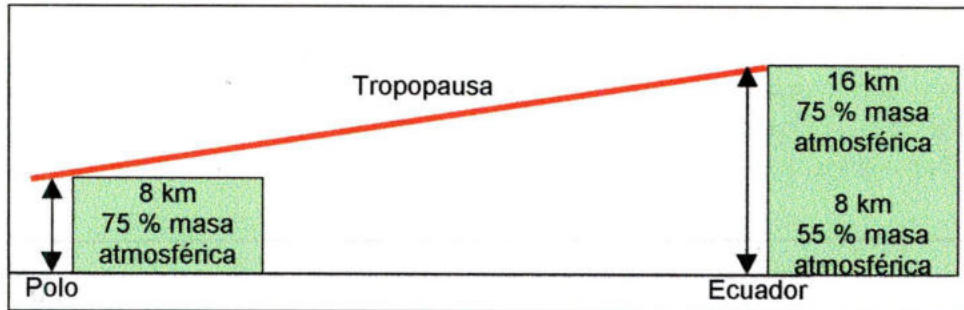


Figura 3.4 Esquema de los cambios de Densidad en la Tropósfera con la latitud

Aunque la tasa de disminución de la temperatura con la altura sea constante y desde ese punto de vista el aire a la misma altura debería tener la misma temperatura, no sucede lo mismo con la densidad, por lo que en la atmósfera real, dada la relación entre densidad y temperatura, dos parcelas de aire situadas a la misma altura no tienen la misma temperatura ni la misma densidad y en consecuencia, no ejercen la misma presión. Por ello, en meteorología es mucho más común porque es más cómodo, como lo señala Medina (1994), hablar de superficies isobáricas (igual presión), por ejemplo las de 850, 500 o 200 mb, que en la atmósfera se encuentran a alturas diferentes. En la atmósfera tropical, al ser menos densa por tres razones (mayor espesor para repartir la misma masa de aire, es más cálida y es más húmeda), las superficies isobáricas se encuentran a mayor altura que en otras latitudes.

La presión atmosférica regula el movimiento horizontal del aire, y éste se desplaza desde las zonas de Alta Presión hacia las de Baja Presión; como esta distribución es zonal debido a las diferencias en la Radiación Neta, el viento debería soplar meridionalmente (desde la Alta Presión polar en el norte hacia la Baja Presión ecuatorial en el sur) y cortar a las isóbaras perpendicularmente, pero como ya se explicó, la Fuerza de Coriolis hace que el movimiento se desvíe a la derecha y el viento (en ausencia de fricción) termina soplando zonalmente (este-oeste) y paralelamente a las isóbaras; la fricción modifica esta situación y hace que el viento corte en ángulo máximo de 20° a las isóbaras, pero en la atmósfera libre por encima de la capa de fricción (a partir de los 1500-2000 msnm aproximadamente) el viento sopla paralelo a las isóbaras, lo que se conoce como viento geostrófico (Longley, 1970; Barry y Chorley, 1985).

Se tiene en resumen los siguientes hechos con respecto a la estructura vertical de las presiones y el movimiento del viento: primero, las superficies isobáricas no se encuentran a la misma altura en toda la atmósfera, sino que tienden a estar más altas en la zona tropical que en las demás regiones del planeta; segundo, el viento sopla desde las Altas hacia las Bajas presiones, paralelamente a las isóbaras en la atmósfera libre; tercero, en superficie existe sobre el Ecuador una Baja Presión y en el Polo una Alta Presión, mientras que en altura la situación se invierte, con Alta Presión sobre el Ecuador y Baja Presión en el Polo. En la Figura 3.5 se muestra un esquema de lo expuesto en los

en las capas por debajo él se produce una subsidencia generalizada, lo que explica las grandes zonas desérticas subtropicales (ver Figura 3.6).

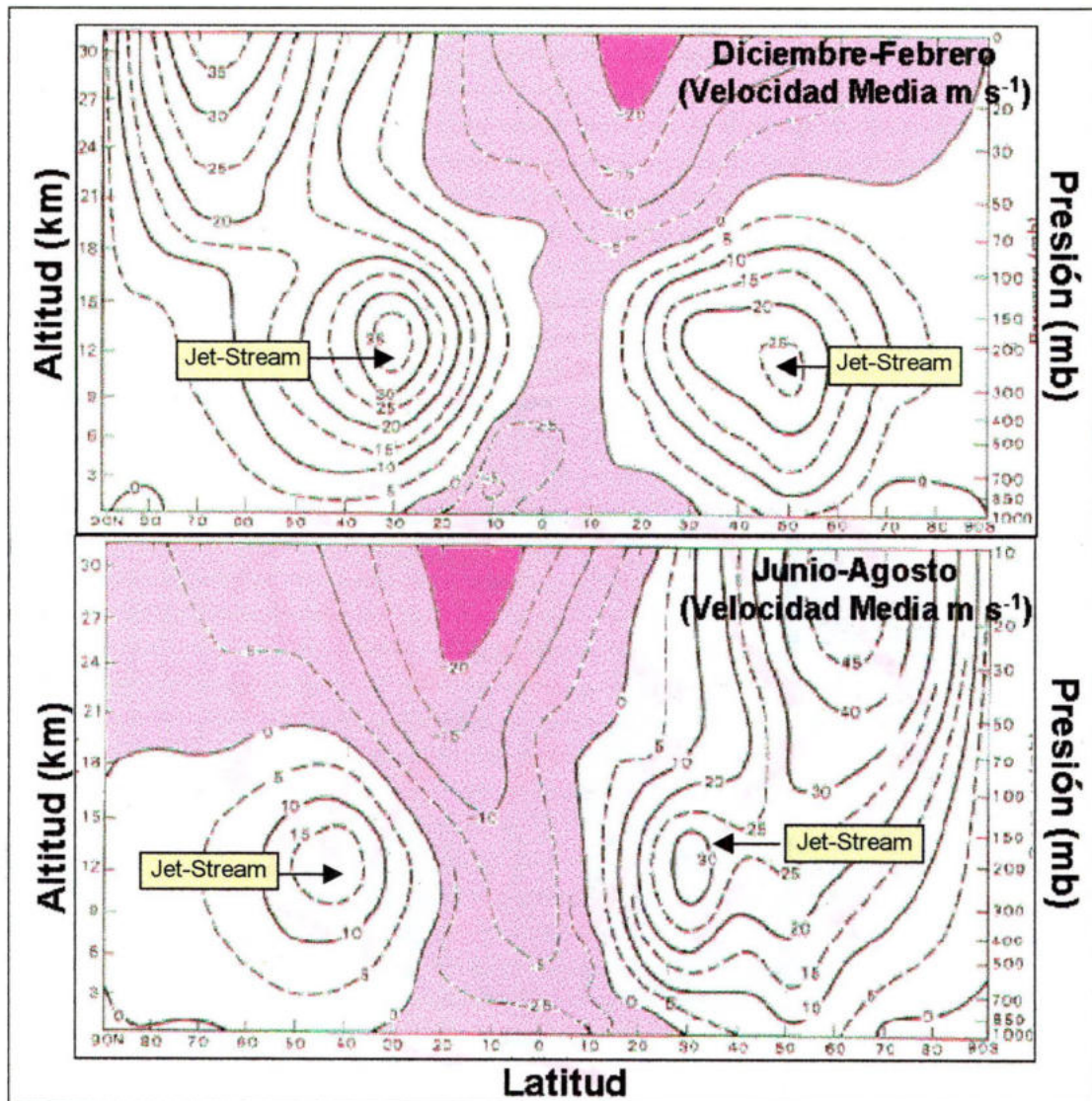


Figura 3.6 Viento Zonal Promedio para los trimestres Diciembre-Febrero y Junio-Agosto (ms⁻¹). Fuente : Lockwood, J.G. (1974). (after Newell et al, 1969). Los valores negativos en morado señalan vientos del este (E), los positivos vientos del oeste (W).

Bajo el Jet subtropical entonces se produce una aparente contradicción : una zona de Alta Presión cálida. Al mismo tiempo que el aire se está calentando mientras desciende, también se acumula mayor cantidad de masa en la columna de aire, por lo que aumenta su presión; como resultado, se tienen alrededor de la Tierra en esas latitudes (20°-30° N y S) dos cinturones de Altas Presiones de origen dinámico, no térmico, como es el caso de la Alta polar y la Baja ecuatorial, y mientras el aire está descendiendo, la Fuerza de Coriolis le imprime un componente zonal, por lo que en

convergen en la zona ecuatorial, creando la *Zona de Convergencia Intertropical*, que se superpone sobre la Baja Presión ecuatorial. El régimen del Alisio es muy estable alrededor de toda la Tierra, con la excepción notable del sudeste asiático. En esa región, debido a su particular distribución de tierras y mares, se generan fuertes gradientes estacionales de temperatura tierra-mar, y en consecuencia gradientes de densidad y presión también muy fuertes, por lo cual en el verano astronómico el Alisio del SE cruza el ecuador convirtiéndose en Alisio del SW, y en invierno el Alisio del NE se convierte en Alisio del NW; esto es lo que se conoce como *Monzón*. El Monzón, aunque sólo ocurre en aproximadamente la quinta parte del área intertropical, introduce cambios significativos, vía teleconexiones, en otros lugares de la Tierra.

- El cinturón de vientos del oeste (*Westerlies*) en superficie en las latitudes medias, aproximadamente entre los 30° N y los 50°–55° N. La distribución de los vientos en altura es, como la del campo de presiones, más simple : hay vientos del este entre aprox. 10° N–10° S, y luego vientos del oeste alrededor de los vórtices polares en ambos hemisferios.
- Los Frentes polar y subtropical en superficie; el Frente polar se encuentra entre los 50°–60° N y el subtropical entre los 30°–35° N. Son la manifestación en superficie de las discontinuidades en la Tropopausa, y se forman en la zona de contacto entre grandes masas de aire con fuertes diferencias de temperatura y humedad. El Frente polar se da entre las masas de aire polar y subtropical, y el Frente subtropical entre las masas de aire subtropical y ecuatorial; como las masas de aire polar y subtropical presentan mayores gradientes que las masas subtropical y ecuatorial, la zona del Frente polar está mucho mejor definida que la del subtropical, y allí es donde se da el proceso de frontogénesis, es decir, la formación permanente de frentes fríos y calientes generadores de borrascas que, inmersas en el movimiento general de los *Westerlies*, se mueven desde Estados Unidos hacia Europa. Los dos principales mecanismos de transferencia de calor y momento en la atmósfera son el transporte vertical a través de los Cúmulo Nimbus, típico de la zona ecuatorial, y el transporte horizontal por remolinos (eddies), es decir, las borrascas que se generan en la zona del Frente polar.
- Los Jet-Stream polar y subtropical en altura (casi al nivel de la Tropopausa), a los 50°–55° N y 30°–35° N aproximadamente. Están estrechamente relacionados con las discontinuidades de la Tropopausa y con los Frentes polar y subtropical; de hecho, los Jet-Stream, especialmente el polar, parecen ser los “conductores” de la actividad de frontogénesis.
- Las Ondas de Rossby en altura; en las latitudes medias, hacia los 50°–55° N, por efectos dinámicos de la rotación, el flujo de viento del oeste, en su circunvalación de la Tierra se ondula, formándose como “olas” de miles de km de largo (abarcen decenas de grados de longitud), y en general el flujo de viento, en lugar de ser completamente circular, presenta entre tres y cinco de estas ondas. Las Ondas de Rossby presentan posiciones preferenciales al parecer relacionadas con las altas cordilleras de Los Andes, las Montañas Rocosas y Los Himalaya. Las Ondas de Rossby están relacionadas (aunque aún no se tiene la explicación

en este caso, el Pacífico está más frío que lo normal, y respecto a la atmósfera, los campos de presión están en su lugar habitual, pero son más intensos, así como el Alisio es reforzado.

Dadas las gigantescas cantidades de calor sensible y latente que se intercambian entre la atmósfera y el océano en el área del Pacífico, las alteraciones que produce el ENOS se reflejan al nivel global, afectando a muchos lugares de manera diversa; por ejemplo, se ha reportado que los años Niño producen sequías en el Nordeste del Brasil e inundaciones en el sur de Brasil y norte de Argentina, y hacia Norteamérica tienden a producir inviernos suaves. En general, durante años Niño se registran temperaturas elevadas en muchas partes del mundo (WMO, 1999).

3.2. La Variabilidad Climática

La Variabilidad Climática, que como ya se vio es una de las características intrínsecas del Sistema Climático, es en consecuencia una de las condiciones que conforman el "Ambiente" del planeta Tierra, así como una de las principales influencias sobre todos los sistemas socio-económicos.

Una de las causas de la Variabilidad Climática temporal es la existencia de ciclos; los más importantes son el diario y el anual. El ciclo diario es muy notable en los elementos climáticos como temperatura y radiación; el ciclo anual de esos elementos es menos marcado en las zonas intertropicales, mientras que en la precipitación tiende a ser más marcado. En el ciclo anual se produce la Variación Estacional. Ambos ciclos, el diario y el anual, están sujetos a la variación entre años diferentes, lo que se conoce como Variabilidad Interanual.

Además de los ciclos diario y anual, existen ciclos a otras escalas temporales, desde variaciones intra-estacionales de 40-80 días como las Oscilaciones Madden-Julian (NOAA, 1999), hasta variaciones de miles de años, como los ciclos de Milankovitch, originados por cambios en la órbita de la Tierra (Lamb, 1972), pasando por variaciones en el orden de décadas, como en el ciclo de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS, 2-7 años) o los de la Oscilación Quasi-Bianual del campo de vientos en la baja Estratósfera (2-2.5 años). En el caso de los ciclos en el orden de los cientos de años, actualmente se cree que están relacionados con interacciones atmósfera-océano como en el caso del ENOS, pero en lugar de ser con la capa superficial (aprox. los primeros 100-200 m de agua), se relacionan con la circulación de las corrientes termohalinas y la circulación de aguas profundas (Lamb, 1972; IPCC 2000 b).

La investigación reciente a escala mundial, señala una creciente evidencia de que los patrones de variabilidad a los niveles intra-estacional e interanual, tienen "estados preferidos", es decir, frecuentemente se produce un determinado tipo de cambio en el régimen de circulación. Se teme que el Cambio Climático afecte las distribuciones de frecuencia de dichos estados, con la consecuencia de una pérdida parcial de la capacidad predictiva del Tiempo Atmosférico (IPCC, 2000 c).

No todos los elementos cuya interacción produce el clima varían en el mismo grado; a nivel interanual por ejemplo, la temperatura y la radiación en zonas tropicales son poco variables (es

temporal del comportamiento de la precipitación, como señalan Gibbs *et al* (1978), tiene enorme influencia sobre :

- la respuesta de sistemas físicos (por ejemplo el rendimientos de cultivos, los caudales de ríos, la recarga de acuíferos);
- la organización de labores (ej. fechas de siembra, transporte fluvial, manejo de embalses);
- la prestación de servicios (ej. hidroelectricidad, seguros agrícolas, comercialización de productos).

Actualmente, la tendencia mundial para todas las áreas ambientales es que, el enfoque para los estudios debe estar basado en el Riesgo para la actividad y/o proceso que se analice, y el Riesgo es función tanto de la incertidumbre, es decir, de la variabilidad, como de la vulnerabilidad de los sistemas. El Riesgo puede ser cuantificado por Indicadores, aplicando al estudio herramientas genéricas (como modelos y análisis estadísticos), y estos elementos pueden ser afinados introduciendo información sobre cambios (naturales o antrópicos). A partir de todo esto, pueden establecerse las posibles respuestas adaptativas de los sistemas socio-económicos para mejorar su eficiencia, minimizar impactos negativos y lograr un desarrollo sostenible (WMO, 2000). Estas respuestas adaptativas pueden ser vistas como decisiones estratégicas para optimizar las actividades tradicionales, así como también como una de las vías para enfrentar la problemática de los impactos que puede generar el Cambio Climático.

3.3. El Clima de Venezuela

3.3.1.Descripción General

Venezuela es un país con gran diversidad climática, que permite el desarrollo de variadas actividades (agrícolas, forestales, energéticas, y turísticas), y en conjunto con la amplia gama de espacios geográficos, determinan un enorme conjunto de ecosistemas, que hacen que desde el punto de vista de la biodiversidad, el país se considere megadiverso (MARN, 2001).

El comportamiento de los elementos meteorológicos Radiación Global, Fotoperíodo, Temperatura, Insolación, Evaporación y Humedad Atmosférica, es típico de la zona intertropical donde se encuentra el país, presentando un ciclo anual relativamente poco marcado (pequeña Variación Estacional), con diferencias entre los valores máximos y mínimos del orden del 10% al 20%, aunque puede alcanzar el 30% en el caso de la evaporación.

Los elementos del régimen de energía se comportan, en general para la mayor parte del país, como sigue (MARNR, mimeografiado s/f; Alvarez Bernal, 1983):

- **Insolación** : Valores promedio de 5,5 a 9 horas/día, con valores extremos de hasta 12 horas/día; la mayor cantidad de insolación se presenta en las zonas costeras y la menor en el sur del país, el Delta y en la zona de alta precipitación de Táchira y norte de Apure, como se ve en la Figura 3.9. En general, es alta en temporada seca (máximo variable entre febrero y marzo), baja en temporada lluviosa (mínimo variable entre junio y julio), aunque en muchas zonas los mínimos se presentan en la entrada de aguas (abril – mayo).

Los elementos del régimen de humedad en fase vapor, se comportan como sigue :

- **Evaporación** : Valores promedio en zonas bajas de más de 2000 mm anuales, y en zonas altas menores a 500 mm anuales. En general, es alta en temporada seca (máximo en marzo en prácticamente todo el país) y baja en temporada lluviosa (mínimo variable entre julio y agosto).

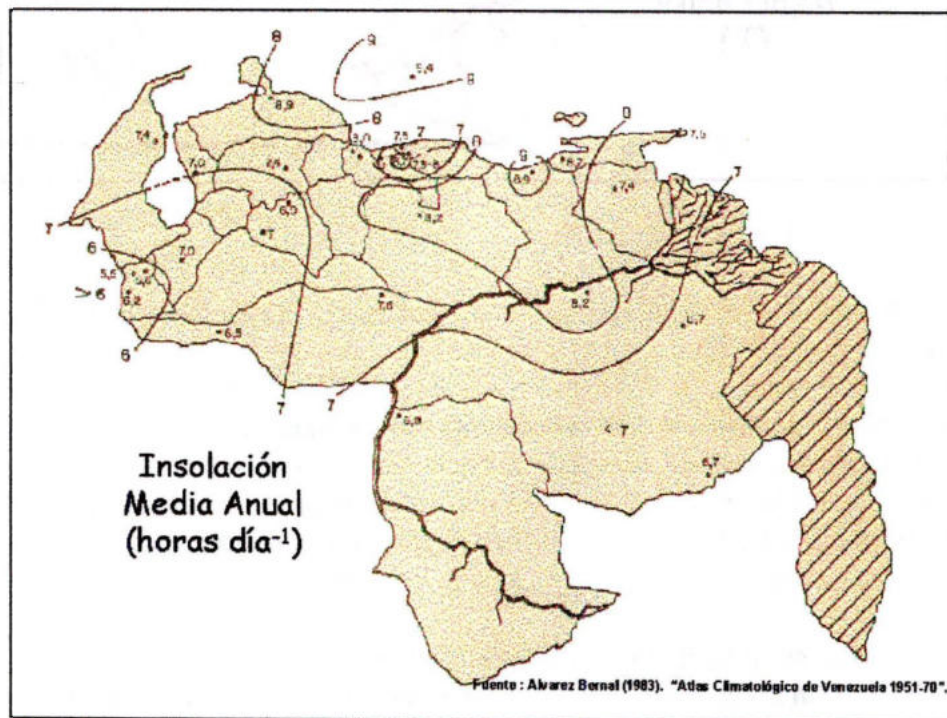


Figura 3.9. Fuente : Alvarez Bernal, F. (1983)

La situación latitudinal de Venezuela (de 0° a 12,5° N) explica el comportamiento bimodal y los altos valores de Radiación y Temperatura; asimismo influencia a la dinámica atmosférica (Circulación General, los grandes patrones de movimiento del aire), la cual explica a grandes rasgos el comportamiento de las temporadas seca y lluviosa.

3.3.2. Principales Factores Climáticos en Venezuela

A escala global, como ya se explicó, los rasgos planetarios de la Circulación General importantes para la zona Intertropical son las Altas Presiones subtropicales, la Baja Presión ecuatorial y la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde convergen los Vientos Alisios del NE y del SE, y todo el conjunto de zonas de Presión se mueve "siguiendo al sol", es decir, a la zona de máximo calentamiento. En el país la temporada seca se produce cuando el sistema se mueve hacia el sur, durante el invierno astronómico (diciembre a marzo), ya que entonces predomina la influencia de la Alta Presión del Atlántico; en esa época la ZCIT se encuentra aproximadamente a los 2° N, sobre el sur de Amazonas (Goldbrunner, 1984). En las zonas de Alta Presión, se presenta una inversión de temperatura, a una altura entre 1500 y 2500 metros, llamada Inversión del Alisio. El aire sobre la capa de inversión es muy estable, por lo que las nubes no pueden seguir creciendo, y dado que el nivel de condensación (altura de la base de la nube) se encuentra a una altura aproximada de 900–1200 metros, la resultante es que las nubes que se forman son de muy poco espesor, generando muy escasas probabilidades de precipitación (Goldbrunner, 1984).

Todo el sistema se mueve hacia el norte durante el verano astronómico (junio a septiembre), por lo que para esta época casi todo el país está influenciado por la ZCIT, cubierto por un cinturón de nubes productoras de lluvia. En la ZCIT están funcionando permanentemente dos mecanismos que producen el mismo resultado : la formación de nubes convectivas (de desarrollo vertical). El primer mecanismo es térmico, gradientes horizontales de temperatura de la superficie generan burbujas de aire más caliente y menos denso, que tienden a ascender; el segundo mecanismo es el de convergencia del viento, que también obliga al aire a ascender.

En realidad, la ZCIT es un concepto que aún provoca discusiones teóricas entre los meteorólogos, y no se cuenta con una definición única. Está mucho mejor definida sobre los océanos, como una franja nubosa zonal (este–oeste), cuyo movimiento es marcadamente meridional (norte–sur). En contraste, sobre los continentes es mucho más irregular, y su movimiento, al menos en Venezuela, es en promedio del SW hacia el NE (García y Guerra, 1993). Esto explica porque comienza a llover primero en los Llanos occidentales, luego en los centrales y finalmente en el oriente del país. Hidalgo (1992) sostiene que de hecho, la forma de las zonas nubosas dentro de la ZCIT es tan diferente entre los océanos (bandas zonales) y los continentes (centros tendientes a forma circular) que puede sospecharse de dos mecanismos diferentes para la formación de la precipitación (ver Figura 3.11), y propone seguir llamando ZCIT a la actividad de convergencia del viento que forma nubes en bandas sobre el océano, mientras que al mecanismo que actúa sobre tierra, del tipo de convección vorticial, sugiere llamarlo Convección Tropical Suramericana.

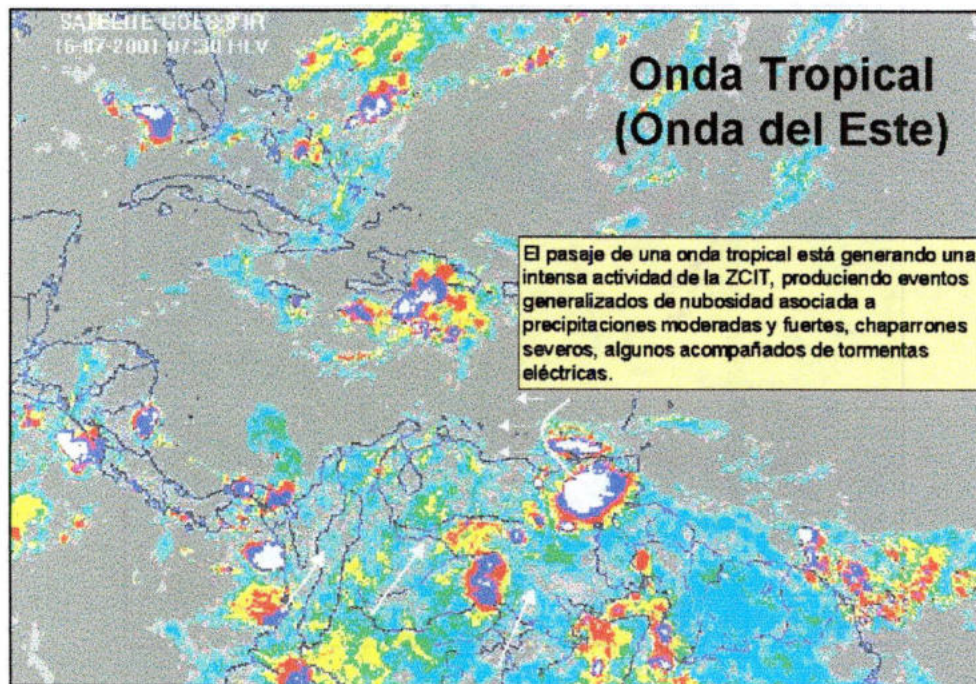


Figura 3.12 Onda del Este. Fuente : MARN, Dirección de Hidrología y Meteorología, Dpto. de Alerta

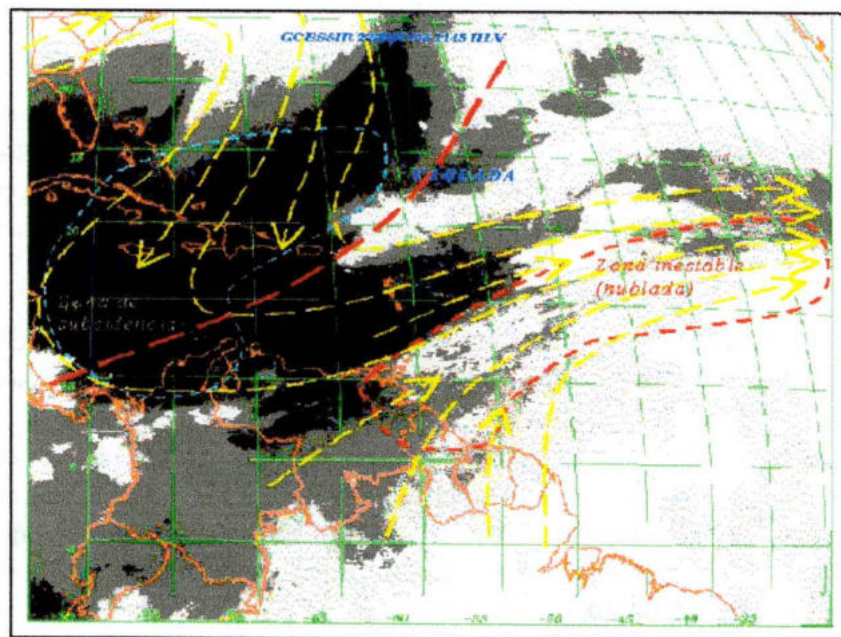


Figura 3.13 Vaguada en Altura. Fuente : MARN, Dirección de Hidrología y Meteorología, Dpto. de Alerta

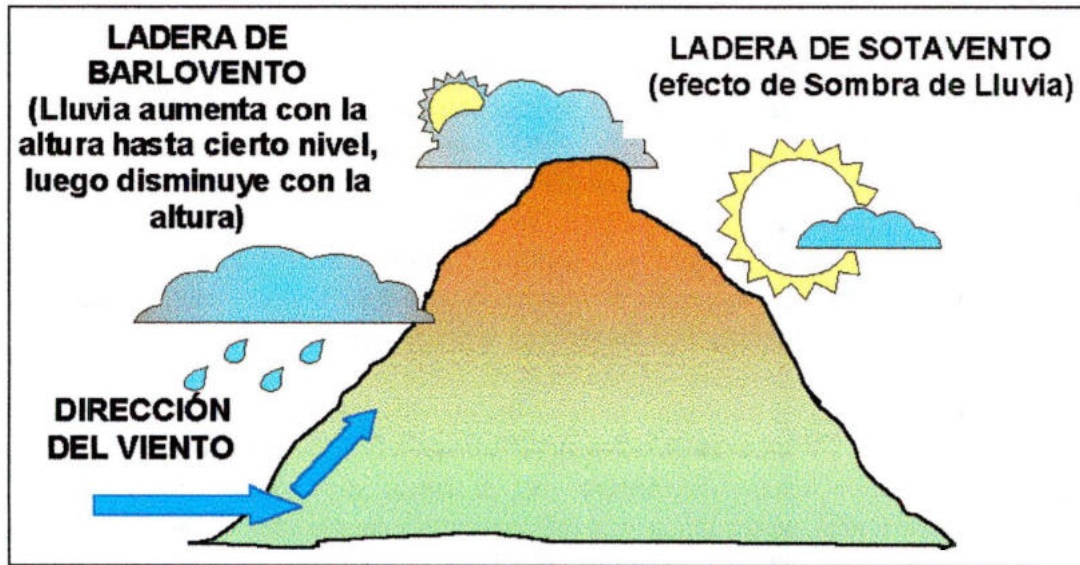


Figura 3.15 Esquema de los principales efectos topográficos sobre la precipitación. Fuente : modificado de MARN, mimeografiado, s/f.

El aumento de la lluvia con la altura en la ladera de Barlovento ocurre hasta cierto nivel, a partir del cual la lluvia disminuye con la altura; Goldbrunner (1984) reporta que dicho nivel es aproximadamente 2500 msnm en las vertientes interiores y orientadas al SE de los Andes, mientras que en las vertientes andinas orientadas al NW y en la Cordillera de la Costa la lluvia disminuye con la altura a partir de los 1200 msnm aproximadamente. La disminución de la precipitación con la altura puede ser muy significativa : en los Páramos, a unos 4000 msnm, llueven apenas unos 600 mm anuales (Martelo, 2000 b). La ladera de Sotavento generalmente además de ser más seca es también más cálida que la de Barlovento, ya que el aire se calienta adiabáticamente a medida que desciende.

En el país se distinguen una serie de regiones que presentan condiciones climáticas muy influenciadas por la topografía, entre ellas el sur del Lago de Maracaibo; aquí, la topografía obliga al viento a girar ciclónicamente (en sentido anti-horario), en la unión de las Cordilleras de Perijá y Los Andes, y tal giro inestabiliza al aire, generando condiciones adecuadas para la formación de nubes verticales (convectivas) productoras de tormentas, especialmente cuando se da sobre una superficie evaporante permanente (el lago). Esta situación se ve reforzada en la noche por la ocurrencia de una brisa tierra-lago, producto de las diferencias térmicas entre la tierra fría y el agua caliente. Por el contrario, durante el día la tierra está más caliente que el agua, y la brisa es lago-tierra, en contra de la circulación ciclónica, por lo que el proceso de formación de nubes disminuye. Este conjunto de circunstancias hace del sur del Lago de Maracaibo una zona de permanente actividad eléctrica, que se conoce popularmente como el Relámpago del Catatumbo. (García y Guerra, 1999).

desarrollo en horas de la tarde; por la noche, por el contrario, el aire es más denso y frío sobre la tierra, por lo que se producen brisas tierra-mar. Los sistemas nubosos así formados durante el día adquieren vida propia, y son trasladados por el Alisio tierra adentro, produciendo precipitaciones durante la noche tan lejos como los Llanos orientales. En la cuenca del Caroní se observa este mismo fenómeno, pero con lluvias en la madrugada, producto de las nubes que se generan durante el día en la costa de Guyana Esequiba, por las mismas causas. (García y Guerra, 1999).

Como característica típica de la zona intertropical, la lluvia en Venezuela es de gran intensidad; Gonzalez y Cordova (1992) señalan que comparando las lluvias máximas registradas en Venezuela para diferentes duraciones con las máximas mundiales reportadas por la OMM, las curvas son similares para las duraciones de 30 minutos a 6 horas, pero allí se estabilizan, indicando así una tendencia a precipitaciones concentradas en cortos períodos. La diferencia entre las lluvias máximas registradas en 3 y 6 horas es muy pequeña, mientras que las curvas mundiales son crecientes hasta la duración de 24 horas. Goldbrunner (1984) reporta que el 95% de las precipitaciones en el país caen en forma de chaparrones de 15 a 30 minutos de duración, frecuentemente en la tarde.

Como consecuencia del régimen de energía y de las condiciones de dinámica atmosférica sobre el país, modificados por los factores climáticos de continentalidad y topografía, se producen diferentes regímenes de precipitación y temperatura, que dan origen a toda la gama de tipos climáticos, de cálidos a gélidos, y de áridos a extremadamente húmedos.

A continuación se describen las principales características climáticas de las grandes regiones geográficas del país (MARNR, mimeografiado, s/f), y se presenta la distribución espacial de la precipitación media anual (Figura 3.16), la temperatura máxima media anual (Figura 3.17) y la temperatura mínima media anual (Figura 3.18). Es importante señalar que tanto el resumen mimeografiado como los tres mapas, provienen de una serie de 21 trabajos realizados por 9 diferentes autores en la Dirección de Hidrología y Meteorología del Ministerio del Ambiente, para cada estado del país, utilizando un período común de registro (16 años, 1968-1983) para unas 900 estaciones climáticas; la denominación genérica de esta serie de Informes Técnicos es "Zonificación Agroclimática del Estado ..." (Martelo, 2000 b). En dichos trabajos, la clasificación climática utilizada fue la de Thornthwaite.

REGIÓN GUAYANA

Ocupa 40 % de la superficie del país, y presenta un clima muy húmedo y cálido. En Amazonas y el sur de Bolívar llueve todo el año más de 3000 mm (no hay temporada seca), ya que el área está constantemente bajo la influencia de la ZCIT. Los mínimos se presentan en enero-febrero (más de 100 mm/mes) y los máximos en mayo-junio (más de 800 mm entre los dos). La temperatura promedio anual es de 26° C, con máximas medias (temperatura de las horas de mediodía) de 32° C y mínimas medias (temperatura de la madrugada) de 22° C. La humedad relativa media del aire varía entre 80% a 98%.

REGIÓN DEL LAGO DE MARACAIBO :

Ocupa cerca del 10% de la superficie del país, y presenta también gran variedad climática debido a la presencia del Lago y las cordilleras de los Andes al sur y de Perijá al oeste. Por la situación latitudinal, la parte norte del estado Zulia, a más de 12° N, está fuera del área de influencia de la ZCIT continental, y es afectada por la ZCIT del Pacífico.

Las lluvias presentan gran variación espacial y temporal, y en general al oeste del meridiano 70° W el régimen es bimodal; las mayores precipitaciones ocurren al sur del Lago (> 2800 mm/año), sin estacionalidad ya que aún en los meses más secos (enero a marzo) llueve más de 90 mm/mes. La lluvia disminuye progresivamente hacia el norte, hasta el clima Semiárido de Maracaibo, con menos de 600 mm/año, concentrados principalmente entre noviembre y marzo, producto de los frentes fríos, y el clima Árido de la Península de Perijá (< 200 mm/año). Sin embargo, en la misma zona norte, en las laderas de la Sierra de Perijá, se registran más de 1500 mm/año, a una distancia en la horizontal de menos de 80 km de la Península. La temperatura media varía de 27,5° C en la costa del Lago a menos de 24° C hacia los Piedemontes de Perijá y los Andes. Las temperaturas máximas medias varían de 32° C a 22° C, y las mínimas medias de 22° C a 12° C (en ambos casos las menores temperaturas corresponden a los Piedemonte y zonas de montaña). La humedad relativa media es muy alta, tanto cerca del Lago como en el Piedemonte (de 85% a 90%), mientras que en la zona costera del Golfo de Venezuela varía de 75% a 80%.

REGIÓN DE LA DEPRESIÓN LARA-FALCÓN :

Ocupa aproximadamente el 8% del territorio nacional. Es la región continental más seca del país, con tipo climático Semiárido a Árido (precipitaciones menores a 600 mm), determinado por ser ésta una zona a Sotavento en todas direcciones, es decir, que está bajo el efecto permanente de sombra de lluvia, ya que es una depresión rodeada completamente por montañas. Sólo en las Serranías del área se tienen lluvias de 800-1000 mm anuales.

La precipitación es de unos 500–600 mm/año, con dos máximos de precipitación, el principal de septiembre a diciembre, por influencia de frentes fríos. La temperatura media anual va de 27° C a 24° C (Sierra de San Luis). Las temperaturas máximas medias varían de 32° C en la costa a 26° C en la Sierra, y las mínimas medias varían entre 22° C en la costa y 16° C hacia la Sierra. La humedad relativa media es de 75%.

REGIÓN DE LOS ANDES :

Esta región representa aproximadamente el 7% de la superficie del país, pero es la que presenta mayor cantidad de climas debido a las diferencias altitudinales y topográficas, desde Excesivamente Húmedos a Subhúmedos Secos y, de Cálidos a Gélidos.

Las lluvias se distribuyen irregularmente en el espacio; se observan mínimos de 600 mm/año en los páramos, precipitaciones de unos 900 mm/año en los Valles de Monay (Trujillo) y en Ureña (Táchira), hasta precipitaciones no estacionales mayores de 3800 mm/año, por efecto orográfico, en la cuenca alta del río Uribante (Táchira). Las temperaturas medias van de 24° C (parte baja del

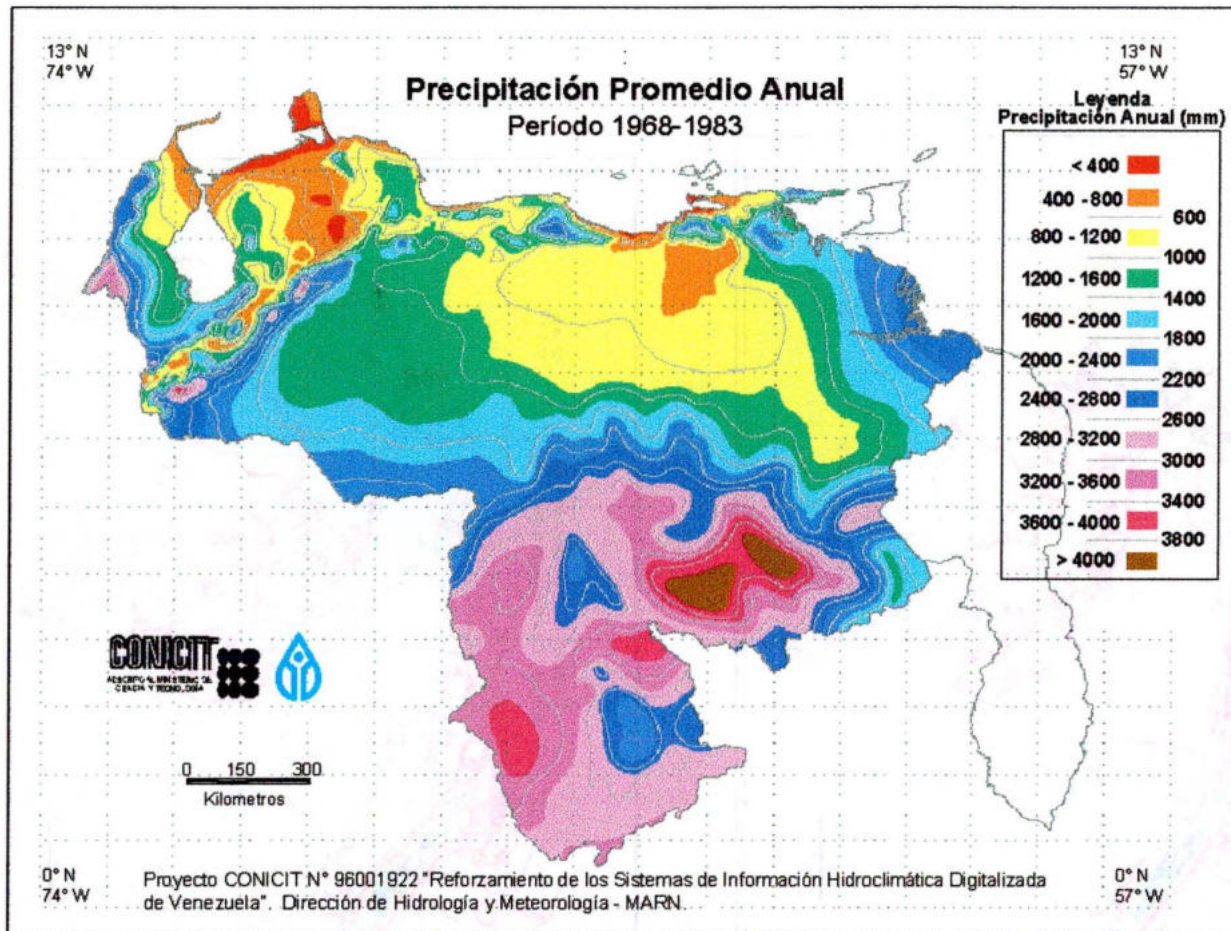


Figura 3.16 Precipitación Media Anual sobre Venezuela. Fuente : Martelo, M.T. (2000 b). Proyecto CONICIT N° 96001922 "Reforzamiento de los Sistemas de Información Hidroclimática Digitalizada de Venezuela".

3.4 Influencia de las Variables Macroclimáticas en el Clima de Venezuela

Con relación a la influencia de las Variables Macroclimáticas (en adelante VM), específicamente sobre el clima de Venezuela, hasta los momentos hay poca información. Prácticamente no se han analizado los efectos de los campos de viento en altura, la convección profunda o las manchas solares. De todas las VM, la más analizada al nivel mundial ha sido la temperatura superficial del Pacífico ecuatorial, ya que es uno de los principales factores indicativos (no el único), del evento El Niño–Oscilación del Sur (ENOS).

A continuación se resume el conocimiento de los efectos del ENOS en el país. En 1997–98 se produjo un evento Niño de gran intensidad, que generó una enorme inquietud pública, razón por la cual la Comisión Nacional de Meteorología e Hidrología (CNMeH), adscrita al CONICIT, preparó un informe (CNMeH, 1998) que resume los análisis sobre el tema realizados en el país por el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARN) y la Compañía del Estado Electrificación del Caroní (EDELCA). Como conclusión principal de los estudios, resalta que el fenómeno ENOS (en sus fases cálida y fría) no afecta de igual forma a todo el país : hacia el suroriente (Guayana) y el occidente (parte de los Andes y Zulia), El Niño (fase cálida del ENOS) tiende a producir temporadas secas e inicio de temporada lluviosa más secas que lo normal, mientras que en las regiones central, llanera y oriental, la influencia del ENOS fase cálida es mucho menos evidente, dándose casos de eventos Niño con inicios de temporada lluviosa tempranos, normales y tardíos. En contraste, un Pacífico neutro (ni frío ni caliente) parece asociarse en esas regiones con un inicio temprano de la temporada lluviosa (Martelo, 2000 a). La fase fría del ENOS (eventos Niña) se relaciona en Guayana con temporadas secas más lluviosas que lo normal, y caudales relativamente altos del Caroní, mientras que en los Llanos, La Niña tiende a producir una entrada tardía de la temporada lluviosa. (Ver Figura 3.19).

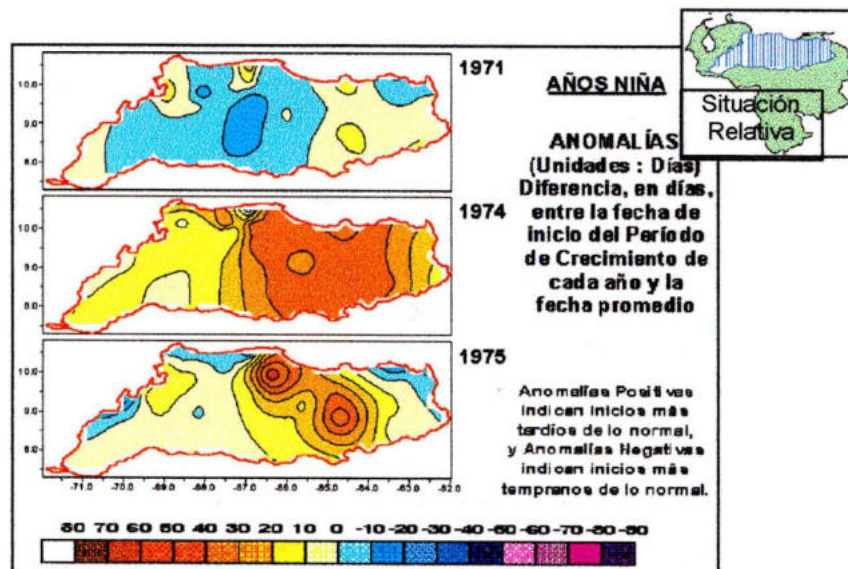


Figura 3.19 Variación en la Fecha de Inicio del Período de Crecimiento en 2 años Niña (1974–75) respecto de un año No Niña. Fuente : Comisión Nacional de Hidrología y Meteorología. (1998).

Otra VM que ha comenzado a analizarse es la temperatura superficial del Atlántico Tropical Norte (ATNOR); Martelo (2000 a) en estudios preliminares, reporta que un ATNOR caliente tiende a asociarse en las regiones centro-norte y oriental con inicios tempranos de la temporada lluviosa, mientras que un ATNOR frío tiende a asociarse con inicios tardíos de la temporada lluviosa; hacia el occidente, el ATNOR no parece tener tanta influencia como el Pacífico en la fecha de inicio de la temporada lluviosa.

En EDELCA han estado trabajando en el tema de las VM desde 1992, realizando análisis con, entre otras VM : el Índice de Oscilación Sur (SOI), la Oscilación Quasi-Bianual (QBO), la Radiación Saliente de Onda Larga (OLR), la temperatura del Atlántico Tropical Sur y varios índices del campo de presión en superficie. Sin embargo, los análisis están referidos básicamente a la influencia de estas VM sobre el caudal del Caroní y no sobre la precipitación, aunque han determinado que un Atlántico Tropical Sur frío parece relacionado con una temporada lluviosa (mayo-octubre) deficitaria sobre Guayana (CNMeH, 1998).

Análisis realizados en la Unidad de Estudios del Clima Tropical (MARN-CIDIAT), utilizando una metodología estadística y el software Sistema de Modelaje de los Océanos (SIMOC) desarrollados en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil, señalan que, sobre una muestra de 150 estaciones de precipitación en el país, las lluvias en el 80% de dichas estaciones están más influenciadas por el comportamiento del Atlántico que por el del Pacífico. Además, las estaciones que conforman el 20% más influido por el Pacífico, están todas al occidente del país (Ing. M.I. Rojas, comunicación personal).

En conclusión, aún no se ha determinado precisamente la influencia real de las VM sobre el clima del país. Aunque se sabe con certeza que las temperaturas oceánicas afectan diferencialmente al territorio nacional, y se conocen las principales áreas geográficas afectadas (el suroriente y el occidente del país), no se conoce aún el porqué la influencia no es siempre igual (por ejemplo, ha habido años Niño con caudales del Caroní bastante altos).

Es importante recalcar, sin embargo, que los resultados no son inconsistentes; uno de los principales aspectos a destacar de los estudios realizados en EDELCA desde el año 92 y en otras instituciones entre 1997 y 1998, es que se usaron metodologías de análisis muy diferentes y aplicadas a diferentes elementos del ciclo hidrológico (lluvias, caudales de ríos, fechas de inicio del período de crecimiento) y todos los resultados señalaron en la misma dirección; desde ese punto de vista, el escaso conocimiento que tenemos de la influencia de las VM en el clima del país es "robusto".

En una primera aproximación se escogieron también tres variables de Teleconexiones (Oscilación del Atlántico norte, Índice del Atlántico este y Jet-Stream del Atlántico este), pero se decidió no incluirlas en el presente trabajo, ya que el modo de cálculo de estos tres índices aún no está completamente uniformizado y presenta, entre otros problemas, el hecho de que en los archivos aparecen con el mismo código los meses en los que no se presentó el evento y aquellos con dato faltante (Dr. Pedro Cárdenas, Meteorólogo, Consultor EDELCA, comunicación personal).

La VM correspondiente al índice que mide la actividad de las manchas solares, denominada Número de Wolf, se obtuvo en la siguiente dirección :

b) www.oma.be/KSB-ORB/SIDC²

Aquí se obtuvo el N° de Wolf en dos versiones, los valores originales (WOLF) y la media móvil de los valores (WOLFMM). Con la excepción del N° de Wolf, para el cual se usaron los valores directamente, todas las demás VM se obtuvieron en forma de anomalías normalizadas mensuales :

$$\text{Anomalía}_{i,j} = (X_{i,j} - X_{\text{media mes}}) / \text{Desviación Estándar}_{\text{mes}}$$

Donde : Anomalía_{i,j} = anomalía de la variable en el mes i del año j

X_{i,j} = valor de la variable en el mes i del año j

X_{media mes} = valor promedio mensual de la variable

Es de hacer notar que no todas las VM tienen el mismo período de registro; el N° de Wolf se ha calculado desde mediados del siglo XVIII (1760, aproximadamente), el Índice de Oscilación Sur desde los años 30, las temperaturas de los océanos han sido reconstruidas desde 1950, y las variables de campos de viento e intensidad de la convección (OLR), sólo están disponibles desde mediados de los años 70, dado que se calculan a partir de datos satelitales.

4.2 Procesamiento de los Registros Originales

4.2.1. Selección de las Estaciones y Período Común

En este trabajo, como en cualquiera en que se analiza precipitación, una de las condiciones de borde es definir el período de registro más largo, con el fin de cubrir el mayor rango posible de variabilidad. En primer lugar, del total de estaciones con más de 30 años de registro se eligieron aquellas que estuvieran funcionando desde 1950, ya que desde ese año se tienen datos de la temperatura de los océanos; esto hizo aparecer el problema de la distribución espacial y el período común : no hay ninguna estación al sur del Orinoco funcionando desde 1950, todas fueron instaladas de 15 a 20 años después, siendo 1968 el año de instalación más común.

En segundo lugar, se hizo una selección de las estaciones en funcionamiento desde 1950 (y de cualquier año posterior en el caso del sur del Orinoco) con base en la calidad de sus registros,

² Institut Royale de Meteorologie, Bruselas, Bélgica.

Las anomalías normalizadas en adelante se referirán, por comodidad, simplemente como anomalías. Como ya se explicó, en el caso de las VM fueron obtenidas directamente a través de Internet, pero en el caso de la precipitación fueron calculadas usando el software estadístico STATGRAPHICS (Statistical Graphics Corporation, Inc., 1988), con base en los archivos del tipo "Normal" de los montos en mm. Con el mismo programa se calcularon los estadísticos básicos de la precipitación (para los montos en mm y para las anomalías) y los de las VM. En el ítem 4.3. se describe con detalle cuáles estadísticos se calcularon en cada caso.

a) Tipo de archivo "Normal" :

Tantas Filas como años de Registro	13 Columnas, correspondientes a los 12 meses y al año			
	Ene	Feb	Dic
1				
.				
N				

Se prepararon 6 archivos EXCEL, 4 para precipitación y 2 para VM; cada uno de ellos tiene tantas hojas como estaciones seleccionadas (1 hoja por estación) o tantas hojas como VM seleccionadas (1 hoja por VM).

Los cuatro archivos de precipitación corresponden a los siguientes datos :

- Montos de precipitación (en mm).
- Anomalías de precipitación (adimensional).
- Anomalías de precipitación clasificadas en -1, 0 y 1, según los terciles (P33% y P66%) de cada mes (adimensional); los terciles fueron calculados según la distribución empírica de los valores observados.
- Anomalías de precipitación clasificadas en 1, 2, 3 y 4, según la desviación estándar (adimensional); para esta clasificación se asumió, *a priori*, que las anomalías seguían una distribución normal, con medias mensuales de cero (0) y desviaciones estándar de uno (1). Las anomalías menores que -1 se asignaron a la clase "1", las anomalías entre -1 y 0 se asignaron a la clase "2", las anomalías entre 0 y +1 se asignaron a la clase "3" y las anomalías mayores que +1 se asignaron a la clase "4".

Los dos archivos de VM corresponden a los siguientes datos :

- Anomalías de las VM (adimensional).
- Anomalías de las VM clasificadas en -1, 0 y 1, según los terciles (P33% y P66%) de cada mes (adimensional); los terciles fueron calculados según la distribución empírica de las anomalías.

b) Tipo de archivo "Series de Tiempo" :

En el caso del archivo de VM, como sólo se tiene un valor para cada mes y año del período de registro, este grupo se repite tantas veces como número de estaciones haya, hasta que el archivo tenga tantas filas como los archivos de precipitación.

Los archivos de precipitación tienen 1 hoja cada uno, el archivo de VM tiene tantas hojas como VM seleccionadas; los archivos corresponden a los datos :

- Anomalías de precipitación clasificadas en -1, 0 y 1 según los terciles (adimensional);
- Anomalías de precipitación clasificadas en 1, 2, 3 y 4 según la desviación estándar (adimensional);
- Anomalías de las VM clasificadas en -1, 0 y 1 según los terciles (adimensional).

d) Tipo de archivo "Surfer" (usados para generar los mapas) :

Tantas Filas como Estac. de Precip.	15 Columnas : 12 meses + 3 para Identificación de las Estaciones de Precip.						
	Latitud	Longitud	Serial	Ene	Feb	...	Dic
Est. # 1							
Est. # n							

Se prepararon 3 archivos EXCEL, todos para precipitación; cada uno de ellos tiene tantas hojas como años de registro (1 hoja por año); los archivos corresponden a :

- Montos de precipitación (en mm);
- Anomalías de precipitación (adimensional);
- Anomalías de precipitación clasificadas en -1, 0 y 1 según los terciles (adimensional).

4.2.3. Prueba de la bondad del software de interpolación SURFER

Dado que uno de los objetivos del trabajo consiste en verificar variaciones espaciales de la influencia de las VM en la distribución de la precipitación, se necesitaba un procedimiento rápido de generación de mapas. Se seleccionó el software SURFER (Win32, Versión 6.04 de 1996), que por ser un programa de geoestadística presenta diferentes alternativas para realizar interpolaciones espaciales, pero primero debía demostrarse que los resultados de la interpolación son aceptables.

Para esto, se produjo el mapa de la Media de Precipitación Anual, con base al número de estaciones y el período de análisis finalmente seleccionado, usando como método de interpolación el Krigging, que se reporta (Isaaks y Srivastava, 1989) como uno de los más confiables cuando se dispone de relativamente pocos datos y muy irregularmente distribuidos en el espacio, ya que minimiza la varianza del error de estimación. Este mapa producto de la interpolación se comparó con el mapa de la Precipitación Media Anual para el período 1968-1983 (Martelo, 2000 b) mostrado en el Capítulo 3, en la Figura 3.16, que como allí se expuso proviene de un conjunto de mapas para cada estado del país, dibujados a escalas 1:250.000, 1:500.000 y 1:1.000.000, con base a unas novecientas estaciones de precipitación.

- d) para los 12 meses y el total anual en cada estación, se calcularon los estadísticos básicos : media, desviación estándar y coeficiente de variación, correspondientes a los períodos decadales y Normales incluidos en el período total de registro seleccionado;
- e) para los 12 meses en cada estación, se calcularon las Diferencias Porcentuales (DP) entre los promedios de los período decadales y el promedio del período de registro total, como sigue :

$$DP_i = (\text{Promedio Decadal}_i - \text{Promedio Total}_i) / \text{Promedio Total}_i) * 100$$

Donde : DP_i = Diferencia Porcentual del mes i

Promedio Decadal_i = Promedio del mes i en la década (10 años)

Promedio Total_i = Promedio del mes i en el período total seleccionado

- f) los totales anuales promedio (mm) de los períodos decadales y Normales de cada una de las estaciones seleccionadas, calculados en (d), se organizaron en archivos del tipo "Surfer", y con el software SURFER, se obtuvieron por interpolación los mapas de distribución espacial;
- g) para los 12 meses, las Diferencias Porcentuales calculadas en (e), se organizaron en archivos del tipo "Surfer", y con el software SURFER, se obtuvieron por interpolación los mapas de distribución espacial, para cada mes de cada década;

Descripción del comportamiento de la Precipitación clasificada en intervalos (usando las Anomalías clasificadas) : con el fin de determinar con que frecuencia ocurren eventos por debajo de lo normal, normales y por encima de lo normal, así como si los eventos extremos presentan o no concentración espacial, se realizaron las siguientes actividades :

- h) se contabilizó, para cada mes en cada estación, el número de veces (absoluto y relativo) en que ocurrieron anomalías de clases -1, 0 y 1 (clasificación según los terciles), así como el número de veces (absoluto y relativo) en que ocurrieron anomalías de clases 1, 2, 3 y 4 (clasificación según la desviación estándar);
- i) para cada mes de cada año, se graficó utilizando el EXCEL, el porcentaje de estaciones en las clases extremas -1 y 1 (clasificación según los terciles);
- j) para cada mes de cada año, se graficó utilizando el EXCEL, el porcentaje de estaciones en las clases extremas 1 y 4 (clasificación según la desviación estándar);
- k) para cada mes de cada año del período de registro total, usando los archivos tipo "Surfer" de las anomalías de precipitación clasificadas según los terciles, y con el software SURFER, se obtuvieron por interpolación los mapas de distribución espacial de las anomalías, pero se hizo de modo que aparecen sólo los *signos* de las anomalías (-, 0, +).

anual de lluvia al norte y al sur del Orinoco. Debe recordarse que el valor de la VM es único para todo el país, a diferencia del de la precipitación; por esta razón, para tener un solo valor de precipitación en el país debe calcularse el promedio espacial (promedio de todas las estaciones).

- para cada mes de cada año, se graficó utilizando el EXCEL, cada una de las VM, a fin de poder comparar estas condiciones con los meses de eventos de muy alta o muy baja precipitación definidas en los apartes (i) y (j) del ítem anterior.

Asimismo, conociendo que varias de las VM presentan ciclos en el orden de los dos años, como el campo de vientos en la Baja Estratósfera (Oscilación Quasi-Bianual, QBO) y el evento ENOS (que combina dos VM, la temperatura del Pacífico y el campo de presiones medido a través del Índice de Oscilación Sur, SOI) se calcularon, usando los archivos del tipo "Serie de Tiempo", las medias móviles de 24 meses, y se graficó una selección de dichas VM.

4.3.3. Análisis de la relación espacial entre la Precipitación y las VM

En esta sección se trata de definir dos de los objetivos específicos : determinar si existe una influencia de las VM sobre la precipitación, y determinar si dicha influencia es uniforme sobre el país o, por el contrario, presenta variación espacial. El procedimiento utilizado fue determinar la distribución espacial de las correlaciones lineales entre las anomalías de precipitación y las anomalías de las VM.

El proceso se realizó por dos vías. En una primera aproximación se utilizaron los valores promedios espaciales del total anual de precipitación al norte y al sur del Orinoco, y se correlacionaron con los valores promedio anual de las VM, para cada año de los diferentes períodos de registro impuestos por la longitud de las series de VM.

Para obtener información más detallada, se usaron los archivos de tipo "Series de Tiempo" para calcular las correlaciones lineales entre las anomalías de precipitación de cada estación y las anomalías de las VM para el *lag* cero (0), con el programa STATGRAPHICS. Esto significa que en cada estación, la lluvia de cada mes de cada año en particular se correlaciona con el valor de la VM correspondiente a ese mes y ese año.

Los valores del coeficiente de correlación "r" de cada estación se llevaron luego a archivos de tipo "Surfer" (un archivo para cada correlación precipitación-VM), y con el software SURFER se interpolaron para obtener la distribución espacial de los coeficientes de correlación. Con base a las diferentes longitudes del período de registro de las VM, y en consecuencia con el número de elementos de las series, se determinó a través de las pruebas t de Student y F de Fisher si las correlaciones son estadísticamente significativas para un nivel de probabilidad prefijado.

4.3.5. Caracterización del Tipo de Influencia (Efectos) de las Variables Macroclimáticas sobre las Anomalías de Precipitación

El propósito en esta sección es tratar de determinar los objetivos específicos : sí cualquier valor de las VM afecta a la precipitación o son más bien los valores extremos de VM los que están ejerciendo su efecto, y asimismo sí cualquier valor de lluvia se ve afectado por las VM, o son más bien los valores extremos de precipitación los que manifiestan más los efectos de las VM.

En este punto es importante señalar una serie de condicionantes, para ayudar a comprender la selección del procedimiento utilizado, que fue el de tablas de contingencia.

En principio, el signo de la correlación determina si la relación entre las VM y la lluvia es positiva o negativa, por ejemplo, que la lluvia aumenta en junio a medida que la VM temperatura del océano en el Atlántico Tropical norte aumenta (correlación positiva), o que la lluvia disminuye en enero a medida que la temperatura del Pacífico ecuatorial en el área Niño3-4 aumenta (correlación negativa), pero el coeficiente de correlación no da información sobre la "forma" de la relación, es decir, si se da en todo el rango de valores o más bien entre los extremos.

Al unir la información proveniente de los mapas de correlación espacial y la de los gráficos del transcurso anual de los coeficientes de correlación, se observa por ejemplo, que en junio se espera que la lluvia aumente en los Llanos centrales, sí la temperatura del Atlántico fue alta en marzo (correlación positiva con el *lag* -3), pero :

- ¿se necesita superar un cierto umbral, es decir, ocurre cuando el Atlántico está en el rango normal o en el rango caliente?
- además ¿cómo fueron realmente las lluvias en junio? ¿ocurrió un aumento generalizado de la precipitación en todas las estaciones de los Llanos o hubo lluvias muy fuertes pero en pocas estaciones?
- finalmente ¿todos los años que el Atlántico está caliente en marzo, aumenta la lluvia en los Llanos en junio, o sólo en pocos años, pero con un efecto tan extremo que es capaz de hacer aparecer una correlación donde realmente no la hay?

Para obtener información sobre estos aspectos se realizó un proceso de tabulación cruzada (tablas de contingencia), de modo de contabilizar el número total de casos de precipitación que se producen en todas las estaciones, para cada una de las clases de precipitación, dependiendo de cada una de las 3 clases de VM clasificadas según los terciles. Las tablas de contingencia se calcularon para la lluvia de cada mes del año cinco veces, con las VM correspondientes a los cinco *lags* considerados (0, -1, -2, -3, -4).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Selección de Estaciones y Período de Análisis

El total de 202 estaciones con más de 30 años de registro se redujo a unas 120 instaladas desde 1950 o posteriormente. Al sur del Orinoco, el año más antiguo de instalación, para el mayor número de estaciones, fue 1968. Con relación al análisis de calidad, se seleccionaron primero sólo estaciones instaladas desde 1950 y con menos de 5% de datos faltantes (df), resultando un número de estaciones muy bajo (38); en segundo lugar se aceptaron estaciones desde 1950 o posteriores con menos de 10% de df (28) y finalmente estaciones desde 1950 o posteriores con menos de 15% de df (21); no se aceptaron estaciones con más de 16% de df, aunque tuvieran datos desde 1950. En ese momento se recibió el grupo de 7 estaciones de EDELCA (sólo una desde 1950), con lo que se completó un grupo de 94 estaciones.

Al realizar el análisis de período común de registro, se seleccionó el 1950–1998 para las estaciones al norte del Orinoco y el 1969–1998 para todo el país; no se tomó el año 1968 porque, siendo el de instalación, tiene varios meses faltantes en casi todas las estaciones. Para el grupo de estaciones al norte del Orinoco se calcularon, para cada estación, la media y la desviación estándar de los valores mensuales y del total anual de precipitación, correspondientes a los períodos “cortos” 1950–1968 y 1969–1998, así como al período de registro total 1950–1998. Se realizaron las pruebas de diferencias de medias *t* de Student (Bonnier y Teddin, 1966) y de varianzas *F* de Fischer (Mead y Curnow, 1983) de los dos períodos cortos respecto del total 1950–1998. Para todos los valores (mensuales y anual), en todas las estaciones, estas diferencias resultaron no significativas para el nivel de 5% de probabilidad (no se muestran estos resultados debido a la gran extensión de los cuadros).

En la Figura 5.1 se observa la distribución espacial de los estadísticos básicos media, desviación estándar y coeficiente de variación del total anual de precipitación, para los períodos 1969–1998 (común) y 1950–1998 (total al norte del Orinoco); la figura demuestra que no hay cambios significativos en los patrones espaciales al norte, lo que refuerza la idea de que es poco probable que haya habido un cambio significativo en los patrones espaciales al sur entre 1950 y 1968, aunque no se dispone de datos en el área.

Por otra parte, se obtuvo el promedio espacial de precipitación, es decir, para cada año se calculó el valor promedio anual de todas las estaciones al norte del Orinoco, y a esta nueva serie también se le calcularon los estadísticos básicos y se le aplicaron las pruebas de diferencia de medias y varianzas, como se observa en el Cuadro 1.

Dado que en ninguno de los dos casos (estación por estación y promedio espacial) se observaron diferencias significativas en cuanto a la media y a la varianza (a pesar de que el período 50–68 tiene una media más alta), se asumió que si dicho período presentó al norte del Orinoco una distribución espacial de la media similar a la del período total, y además no fue especialmente variable, tampoco debe haberlo sido al sur del Orinoco. Considerando que para encontrar

En el Anexo 1 se presenta la lista de estaciones, y en la Figura 5.2 su distribución espacial. Puede verse que las estaciones no están uniformemente repartidas, siendo las zonas de los Llanos, Cordillera de Perijá, sur del Lago de Maracaibo y el Delta las menos representadas. Asimismo, son menos numerosas las estaciones de altura, como se desglosa en el Cuadro 2 :

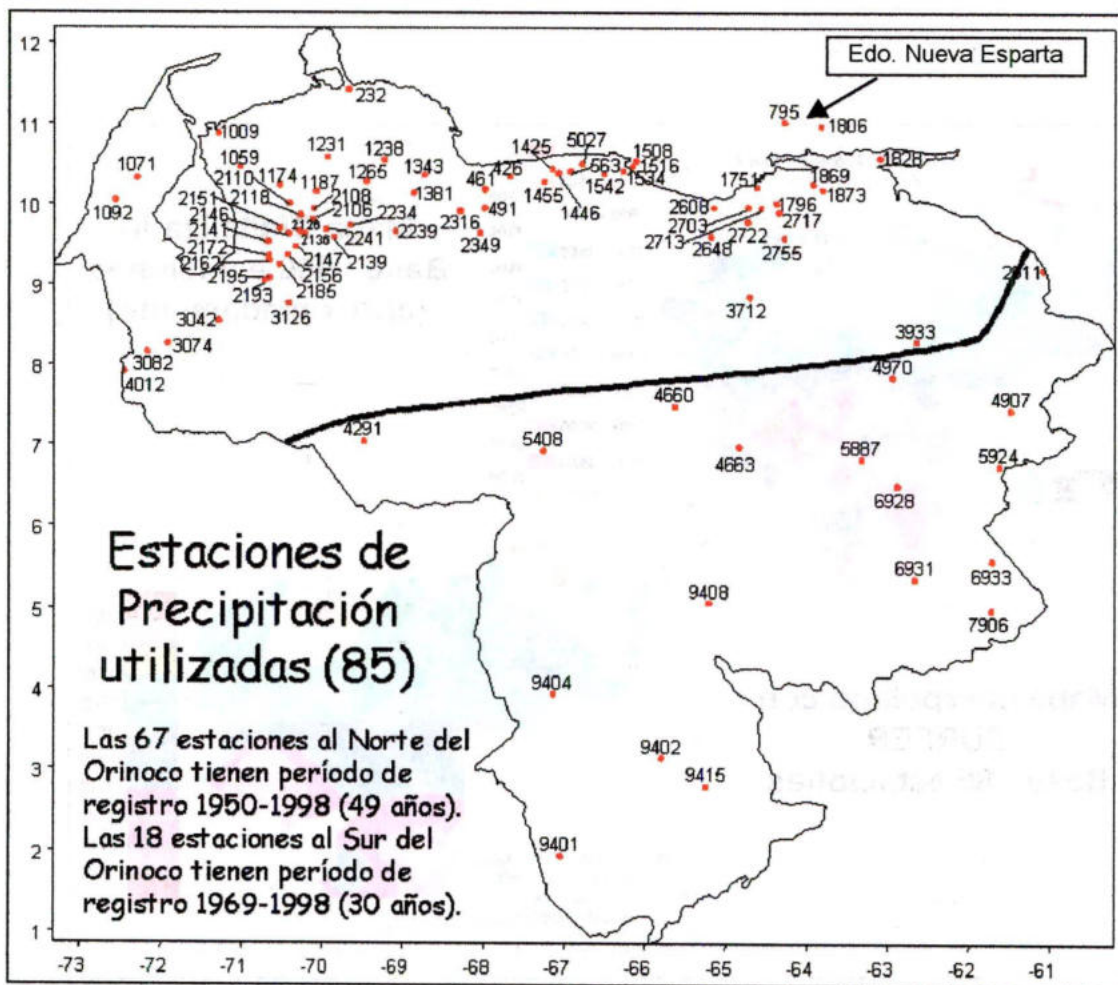


Figura 5.2 Distribución espacial de las Ochenta y Cinco (85) estaciones pluviométricas

Cuadro 2. Resumen de la distribución de las estaciones pluviométricas utilizadas según la altura

Altura (msnm)	Número de Estaciones	Porcentaje (%)
< 500	55	64.71
501-1000	15	17.65
1001-1500	7	8.24
> 1501	8	9.41

5.1.1. Evaluación del Generador de Mapas (SURFER)

observan los núcleos de máxima y mínima precipitación del sur de Amazonas. La complejidad de los Andes, Perijá y sur del Lago de Maracaibo es lo que está peor reproducido, sin embargo en los Andes se observa un núcleo de baja precipitación en las estaciones de altura y, hacia el Piedemonte, un núcleo de alta precipitación (2400–2800 mm), equivalente al del mapa digitalizado.

Con base a los resultados de esta comparación, se asumió que con 85 puntos para calcular la interpolación (es decir, las estaciones), el SURFER puede reproducir satisfactoriamente los principales rasgos de la distribución espacial de la lluvia, y en consecuencia puede usarse como generador de los mapas. Sin embargo, es necesario señalar que cualquier técnica matemática de interpolación encuentra problemas cuando hay muchos registros con valor cero (Dra. Lely Bravo, Centro de Análisis Estadístico y Matemático, Universidad Simón Bolívar, comunicación personal), por lo que es factible que el SURFER reproduzca satisfactoriamente los totales anuales y los meses de la temporada lluviosa, pero podría presentar problemas en los meses de la temporada seca, cuando en muchas regiones del país el valor de la precipitación es cero.

Otro punto que es necesario aclarar es el siguiente : en el mapa interpolado se observa que los puntos más extremos del país aparecen en blanco (Paraguaná al norte, el extremo oeste de la Sierra de Perijá, el extremo sur de Amazonas y el extremo este del Delta). Este rasgo aparecerá sistemáticamente en todos los mapas aquí presentados, ya que es producto del modo de trabajo del SURFER; el programa genera una grilla cuyos límites son los puntos de medición más extremos, y en nuestro caso, están representados por las estaciones Coro-Aeopuerto (serial 232) para el norte, Machiques-Granja (serial 1092) para el oeste, San Carlos de Río Negro (serial 9401) para el sur y San José de Yaruara (serial 2911) para el este. (Ver Figura 5.2)

5.2. El Régimen de Precipitación en Venezuela

Para caracterizar la precipitación, como se explicó en Capítulo 4, Materiales y Métodos, se prepararon los datos básicos en cuatro diferentes tipos de archivos; en el Cuadro 3 se presenta un resumen del número y tipo de archivos empleados.

Una vez determinados los dos períodos de registro total (49 años, 1950–1998 para las 67 estaciones al norte del Orinoco, y 30 años, 1969–1998 para las 18 estaciones al sur del Orinoco, que forman el total de 85 estaciones analizadas) se organizaron los datos según los diferentes tipos de archivos, y a partir de ellos se calcularon los estadísticos básicos tanto para el período total como para los otros períodos de interés climático analizados, los Normales y los decadales.

Cuadro 3. Resumen de los archivos básicos de trabajo

Tipos de Archivos	Nº de archivos para Precipitación	Nº de archivos para Variables Macroclimáticas	Total Archivos
"Normal"	4, con 85 hojas cada uno, cada	2, con 85 hojas cada uno, cada	6

5.2.1.1. Comportamiento de la Mediana de Precipitación

En las Figuras 5.4 y 5.5 puede observarse que en Venezuela la cantidad de precipitación es sumamente variable tanto en el tiempo como en el espacio. En los meses de la temporada seca, enero, febrero y marzo, al norte de los 6° N se presentan valores menores a 50 mm, pero hacia el sur los montos son mayores; de hecho, en el mapa de febrero se observa un "hueco" en los Llanos, ya que el SURFER no fue capaz de interpolar en esa zona, debido a que una alta proporción de estaciones presentan valores de la mediana de cero (0 mm). Como se señaló en el ítem 5.1.1, este resultado no es sorprendente, ya que ningún programa interpolador funciona correctamente si hay un gran campo de ceros. Para marzo sólo la zona del SW de Táchira presenta un núcleo lluvioso, de 100–150 mm. En el extremo sur de Amazonas está entre 200–250 mm.

En abril y mayo se observa la entrada de la temporada lluviosa, con un aumento de la precipitación con dirección general del SW hacia el NE, que indica el avance de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), manteniéndose con medianas menores de 50 mm sólo la Depresión Lara-Falcón y la Cuenca de Unare, que está bajo el efecto de sombra de lluvia del Turimiquire, mientras que hacia el centro de Amazonas y en la cuenca alta del Caroní, se observan núcleos de 350–450 mm de precipitación. Hacia el Piedemonte llanero se observan más de 150 mm, y en los Andes se presenta el primer máximo de precipitación del año, con valores entre 100–150 mm.

En junio y julio está bien establecida la temporada lluviosa al centro y sur del país, con núcleos mayores a 600 mm en la cuenca alta del Caroní. En el Piedemonte andino sigue aumentando la precipitación, con valores mayores a 200 mm, mientras que en los Andes se observa el aumento del área con lluvias < 50 mm, es decir, el descenso estival de la lluvia al W del meridiano 70°, descrito en el ítem 3.2.2, y para el cual no hay una explicación satisfactoria. Asimismo, en julio se nota hacia el Delta, en el extremo NE del país, una disminución de la lluvia respecto de la de junio.

Agosto tiene un comportamiento muy interesante. En términos de la distribución espacial de la mediana, se comporta como un mes de transición, donde la lluvia en el sur del país comienza a disminuir, quedando concentradas las precipitaciones mayores a 450 mm en la cuenca media del Caroní; también en el extremo E del país se intensifica el patrón de disminución comenzado en julio, mientras que al oeste del meridiano 70° W comienza a aumentar la precipitación, manteniéndose sólo la Depresión Lara-Falcón con menos de 50 mm.

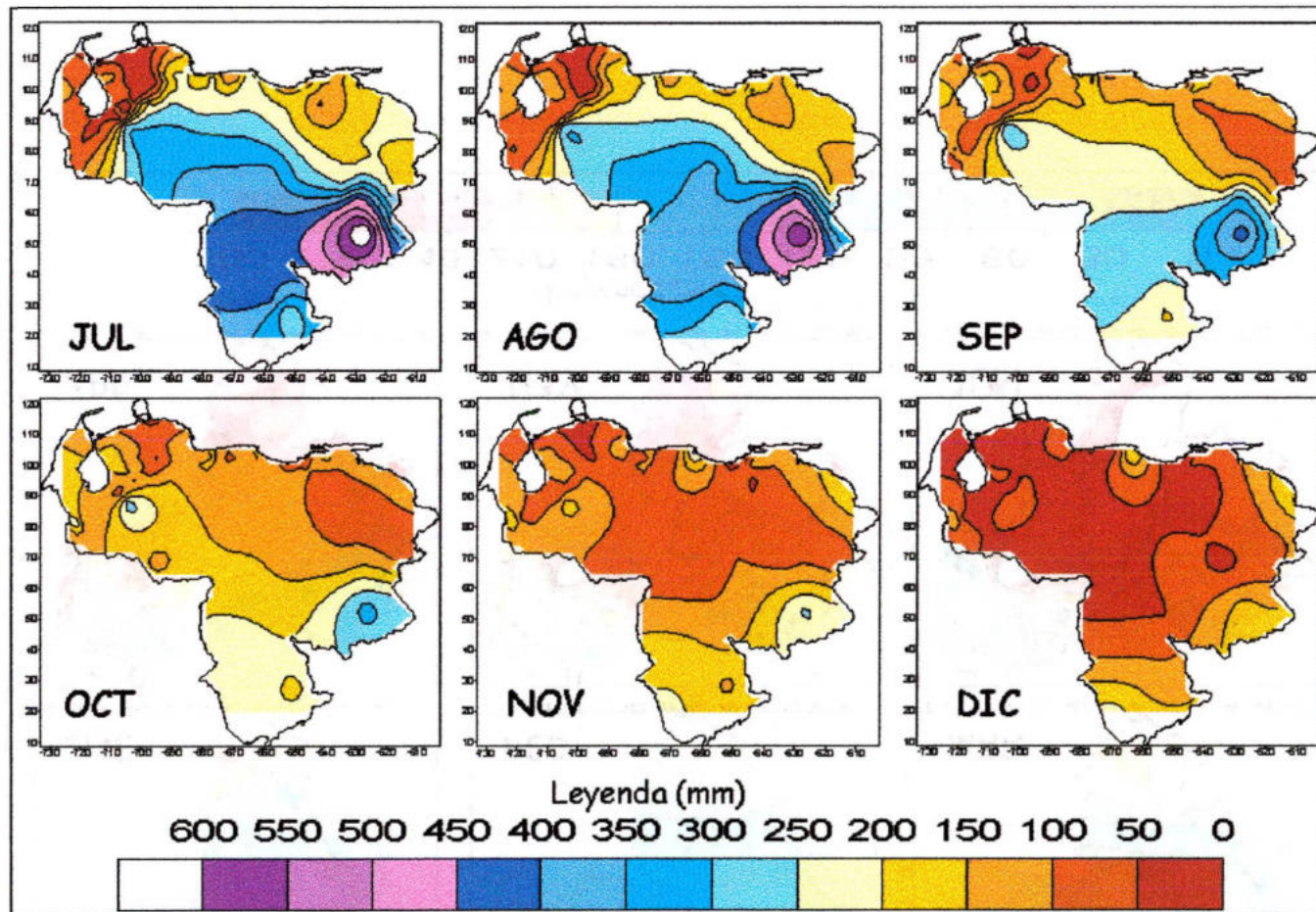


Figura 5.5. Precipitación Mediana mensual para los Períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, 1969–1998 al sur del Orinoco). –
Continuación

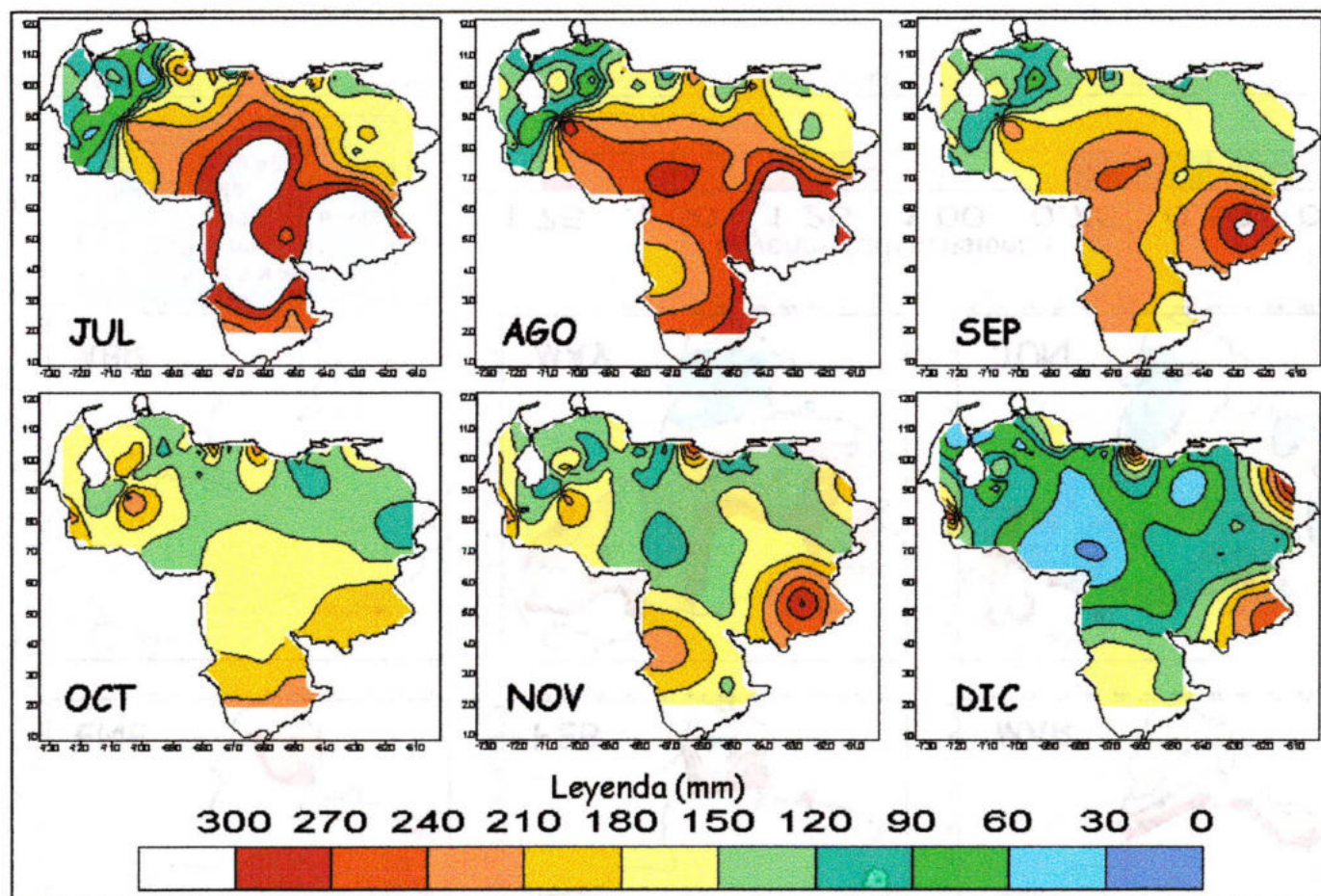


Figura 5.7. Rango Percentil (P90% - P10%) para los Períodos totales (1950–1998 al norte del Orinoco, 1969–1998 al sur del Orinoco). –
Continuación

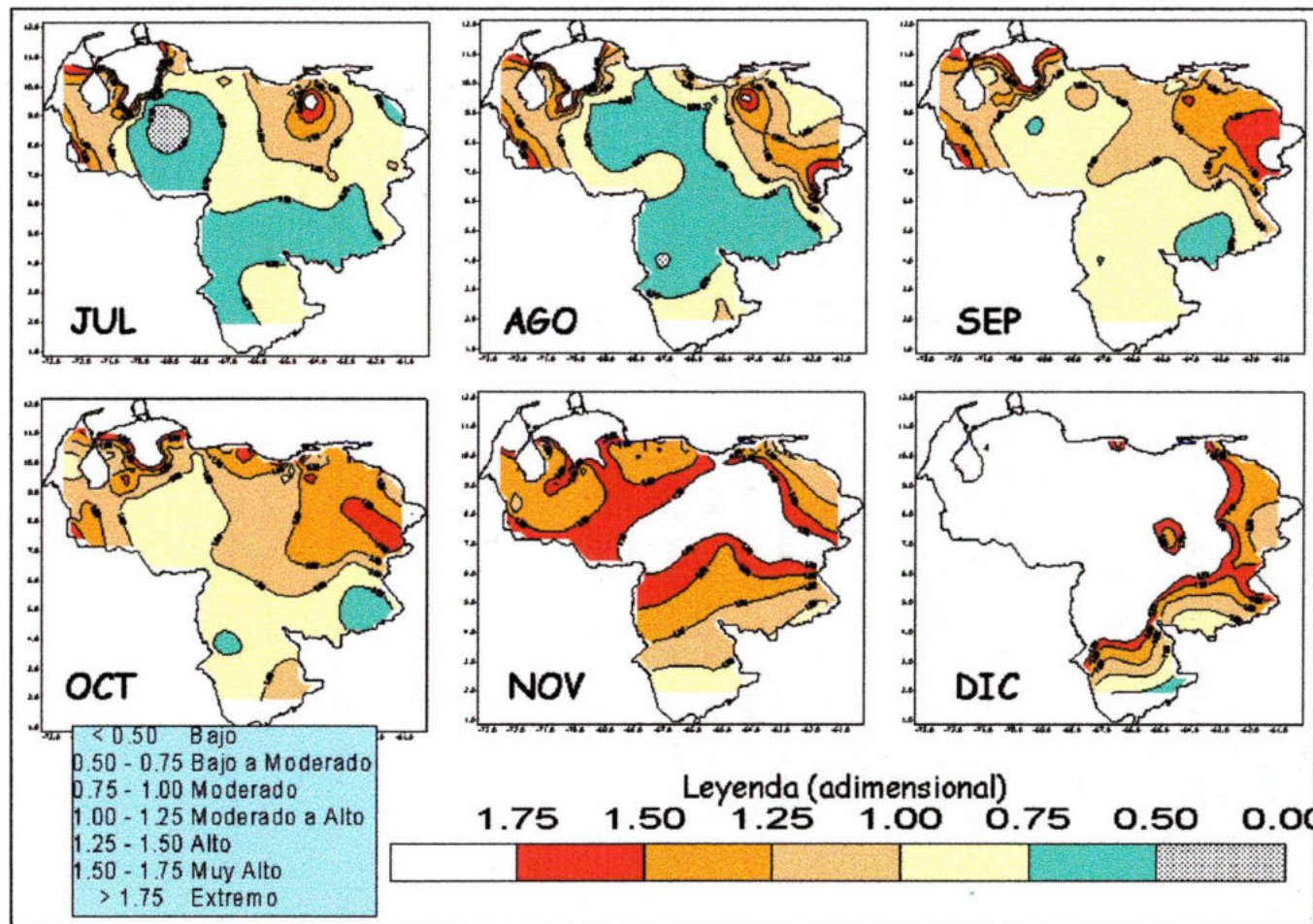


Figura 5.9. Índice de Variabilidad para los Periodos Totales (1950–1998 al Norte del Orinoco, 1969–1998 al Sur del Orinoco). –
Continuación

Sin embargo, a pesar de todas estas consideraciones, el RP ofrece información útil para la toma de decisiones. Si es muy pequeño tratándose del caso (a), desde un punto de vista práctico es claro que en la mayor parte de los años no se dispondrá de agua. Si el RP es grande, y también los valores absolutos de precipitación, es una señal de que basar el aprovechamiento de agua en la simple consideración de que llueve mucho (valores promedios altos) es muy riesgoso, porque disponer de, por ejemplo, 500 mm de agua en promedio, pero variable hasta en 300 mm, hace muy vulnerable al manejo del recurso.

En las Figuras 5.6 y 5.7 se observa la distribución espacial del RP. El mes más establemente seco es febrero, donde en gran parte del norte del Orinoco, la diferencia entre los febreros más lluviosos de la serie y los febreros más secos, no supera los 30 mm, pero en los Andes, norte de Bolívar y el Delta esa amplitud sube a 60–90 mm. Como en esas zonas la mediana es menor de 50 mm, igual que en los Llanos, el menor RP indica que los Llanos son la región más establemente seca en ese mes. En el sur de Amazonas el RP alcanza los 150–180 mm; esta tendencia espacial, pero con rangos mayores, continúa en marzo, donde sólo parte de la Cuenca de Unare sigue siendo establemente seca, con menos de 30 mm de amplitud; marzo también presenta en gran parte del país medianas menores a 50 mm, por lo cual los mayores valores de RP indican que marzo es un mes más variable que febrero.

Siguiendo el aumento de los valores de precipitación en abril y mayo, también aumenta el RP. En los Andes el RP presenta valores de 150–210 mm, y en las laderas de Perijá de más de 210 mm; hacia los Llanos se observa claramente el patrón zonal, con RP en los Llanos Altos occidentales mayores a 210 mm, y en los Llanos orientales y Cuenca del Unare en el rango 60–180 mm, que de nuevo aumenta hacia el Delta. En abril aparece un RP de más de 300 mm en la Gran Sabana, que se amplía en mayo a todo el sur de Bolívar y la vertiente llanera del Piedemonte andino.

En junio y julio el RP disminuye al oeste del meridiano 70° W al rango 60–150 mm, como un reflejo de la disminución estival de la precipitación en el área, pero en las zonas sur y llanera alcanza sus máximos valores, de más de 300 mm. Esto indica que la creencia generalizada de que la cantidad de precipitación en los meses lluviosos es más estable que la de los meses secos no es cierta: la temporada lluviosa puede ser extraordinariamente variable, lo cual tiene gran impacto en todo lo referente a la disponibilidad de agua.

Entre junio y julio se presenta en el sur un cambio significativo en la orientación del patrón del RP: en junio se incrementa siguiendo una línea NW–SE desde el Piedemonte andino hasta la Gran Sabana, *grosso modo* al sur del paralelo 7°, pero en julio se transforma en una línea N–S sobre Amazonas y Llanos centrales, y se mantiene el núcleo sobre el sur de Bolívar. Es interesante observar que el oeste de Amazonas, con medianas de precipitación similares a las del sur de Bolívar, presenta un comportamiento menos variable que el resto de esta región. En el Delta, hay una disminución significativa de los valores del RP entre Junio (210–240 mm) y Julio (150–180 mm).

variabilidad durante los meses de noviembre, diciembre y enero. El mes más establemente seco en prácticamente todo el país es febrero, especialmente en los Llanos y la Depresión Lara-Falcón.

5.2.1.3. Comportamiento del Índice de Variabilidad (IV)

Este indicador combina el valor absoluto de la precipitación (mediana) con la amplitud de la serie (rango percentil, RP), y de hecho, lo que el índice de variabilidad (IV) señala, es que porcentaje de la mediana representa el RP, y si es muy alto indica una serie muy variable. Hay sin embargo una consideración importante : si la mediana es cercana a cero, incluso un RP pequeño va a representar una proporción elevadísima; esto es más bien un problema matemático, pero climáticamente hablando estaríamos en presencia de un mes establemente seco. Este razonamiento es aplicable también para las regiones áridas, donde la lluvia promedio, aunque no cercana a cero, es relativamente baja; en el país, por ejemplo, la Depresión Lara-Falcón presenta sistemáticamente al IV en el rango extremo en todos los meses, independientemente de que el RP sea un poco más alto o un poco más bajo, debido a que la mediana es, en general, pequeña.

Por supuesto, con la situación contraria (valores elevados de la mediana), es posible obtener valores del IV relativamente bajos, es decir, que implican poca variabilidad, si el RP es pequeño; si el RP es alto, estamos en presencia de una serie muy variable (IV altos). Como se expuso en el ítem anterior, esto implica que los meses lluviosos no son necesariamente más estables en su comportamiento que los meses secos.

En las Figuras 5.8 y 5.9 se muestra el comportamiento del IV. En enero, febrero y marzo se nota claramente el problema arriba mencionado, ya que casi todo el país, excepto el sur de Amazonas y Bolívar, presenta un IV que implica variabilidad extrema, pero los valores del rango percentil (Figuras 5.6 y 5.7) indican pequeña diferencia. En marzo se amplía el área al sur del país con IV que implican menor variabilidad, y es muy interesante la aparición de cinturones de menor variabilidad alrededor de los Piedemontes de Perijá, vertiente oeste del Piedemonte andino, la zona de unión de la Depresión Lara-Falcón con los Andes y Piedemonte del Turimiquire hacia el Delta. Para ese mes, todas las regiones presentan una mediana similar, menor de 50 mm, pero hay diferencias en los valores del rango percentil, lo que indica que las zonas de Piedemonte comienzan a presentar en marzo una variabilidad con causa física, y no sólo el problema matemático de la baja mediana.

Abril es un caso extremo; en este mes, buena parte del país presenta tanto medianas como rango percentil relativamente altos, lo que implica una variabilidad con causa física, y serían las zonas con medianas menores de 50 mm donde aún se trata de un problema matemático. En otras palabras, con sólo el valor del IV, es imposible diferenciar entre áreas con elevada variabilidad real y elevada variabilidad por el problema matemático.

Es impresionante el comportamiento del IV en abril, especialmente si se compara con el mapa del coeficiente de variación (que también se produjo, pero no se muestra en este trabajo); en el caso

mapas de valor central (media o mediana) con los de dispersión (desviación estándar o rango percentil) los polígonos de cada una de las clases, para cada uno de los meses del año, y cada actividad económica.

Se puede inferir que una de las consecuencias de tener meses establemente secos o establemente lluviosos, es que pudieran ser más fácilmente predecibles que los meses muy variables; así por ejemplo, sólo con base a estos resultados, se puede inferir que en abril será difícil encontrar relaciones con la Variables Macroclimáticas, o también puede ser que se encuentre que las diferentes Variables Macroclimáticas tienen para ese mes efectos contrapuestos, por lo que en un año en particular predomina el efecto de alguna que aumenta la precipitación, mientras que en otro año predomina el efecto de otra que más bien disminuye la lluvia.

5.2.2. Variabilidad de la Precipitación para los períodos decadales y Normales

A continuación se detallan los cambios en los patrones de precipitación mensual y anual, para los períodos decadales (10 años) y Normales (30 años).

5.2.2.1. Variabilidad Espacial de la Precipitación Anual al norte y al sur del Orinoco

Como una primera aproximación, se calcularon los promedios espaciales de la lluvia al norte y al sur del Orinoco para los períodos decadales, Normales y total. En las Figuras 5.10 y 5.11 se muestran la media y el coeficiente de variación de cada uno de los períodos señalados, para el monto anual de precipitación. Adicionalmente, en el Anexo 3 ("Cuadro" en "estadist1.xls") se muestran los valores de la media, desviación estándar y coeficiente de variación (CV) de cada mes y del monto anual de dichos períodos, para los promedios espaciales al norte del Orinoco (67 estaciones) y al sur (18 estaciones).

Al comparar ambas Figuras, la primera consideración que se impone es que hay una gran diferencia entre la cantidad de lluvia promedio al norte (950–1150 mm) y al sur del Orinoco (2200–2400 mm), y asimismo que espacialmente el sur presenta una distribución menos variable que el norte, como se ve en las tres décadas comunes de 1971–80, 1981–90 y 1991–98**, donde el coeficiente de variación (CV) espacial es de 13%–15% al sur, contra 20%–23% para el norte. Esta situación es esperable, considerando la mayor complejidad fisiográfica y de procesos generadores de precipitación en el norte del país (procesos a escala global como el avance de la Zona de Convergencia Intertropical, procesos a escala sinóptica como las Ondas del Este, Vaguadas y Restos de Frentes Fríos, procesos locales por influencia topográfica). El sur del país, especialmente al sur del Paralelo 4°, se encuentra a efectos prácticos todo el año bajo la influencia de la ZCIT, por lo que es menos notable la variabilidad espacial.

lluviosa y la 91-98** la más seca en los últimos 49 años. En los tres casos, para el norte del Orinoco se nota una variabilidad espacial mucho mayor que en las décadas 51-60 y 61-70.

5.2.2.2. Distribución Espacial de la Variabilidad

Para afinar el análisis anterior, en las Figuras 5.12 y 5.13 se presenta la distribución espacial de los promedios de Precipitación anual, para los períodos decadales, Normales, común 1969-98 (que es el total al sur del Orinoco) y total al norte del Orinoco (1950-1998).

En adelante, todas las comparaciones que se hacen de las décadas, por ejemplo "fue una década muy seca hacia los Andes" o "fueron décadas más lluviosas que las anteriores", se basan en la comparación respecto al comportamiento de los períodos totales al norte y al sur del Orinoco.

Para los valores anuales, las décadas 51-60 y 61-70, que según el promedio espacial fueron normal y muy húmeda respectivamente, en realidad fueron muy lluviosas en Oriente, donde casi no se observa el bolsón seco de sombra de lluvia del Turimiquire, pero fueron secas hacia la parte alta de los Andes.

La década seca 71-80 presentó patrones más complejos : hacia oriente, Cuenca de Unare fue seca, pero el Delta fue lluvioso. En occidente, la parte alta de los Andes fue lluviosa, pero el Piedemonte llanero y la costa oriental del Lago de Maracaibo fueron más secos que en las dos décadas anteriores; esto también se manifestó en el sur de Bolívar, donde no llegó a presentarse el núcleo de más de 4000 mm, pero en Amazonas fue relativamente normal.

La década 81-90 fue muy lluviosa en Cuenca del Unare, así como en Barlovento y la parte alta de los Andes; cercana a lo normal en Amazonas, y muy lluviosa al sur de Bolívar. La década incompleta 91-98** fue muy seca en Amazonas y relativamente seca al sur del Orinoco (el núcleo de más de 4000 mm existe, pero tiene una extensión muy pequeña); también fue bastante seca en Cuenca de Unare, Barlovento y Depresión Lara-Falcón. Hacia occidente, la década fue uniformemente seca : no se observa ni siquiera el núcleo de más de 1600 mm del SW de Táchira, pero hacia los Llanos parece haber sido relativamente normal.

En las décadas 51-60, 61-70 y 71-80 parece observarse un "vaivén" entre las zonas oriental (Cuenca de Unare) y occidental (parte alta de los Andes) del país, cuando una era más lluviosa que lo normal, la otra era más seca que lo normal, sin embargo las 81-90 y 91-98** fueron lluviosa la primera y seca la segunda en ambos lugares.

En general para los períodos largos (Normales y los totales al norte y al sur del Orinoco), se obtienen distribuciones espaciales más semejantes, lo cual confirma la bien conocida necesidad

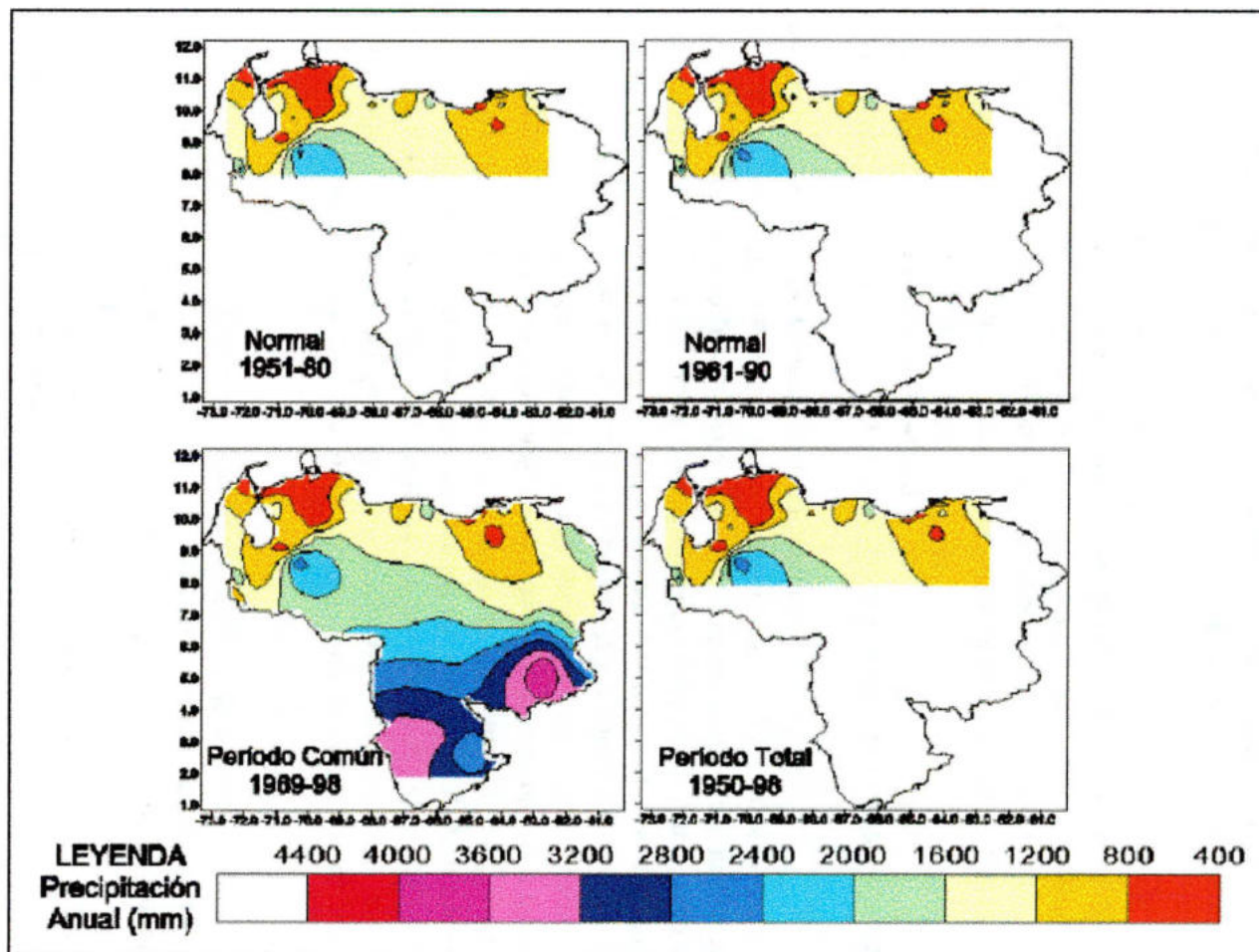


Figura 5.13 Precipitación Promedio Anual (mm) para los períodos Normales, común y total

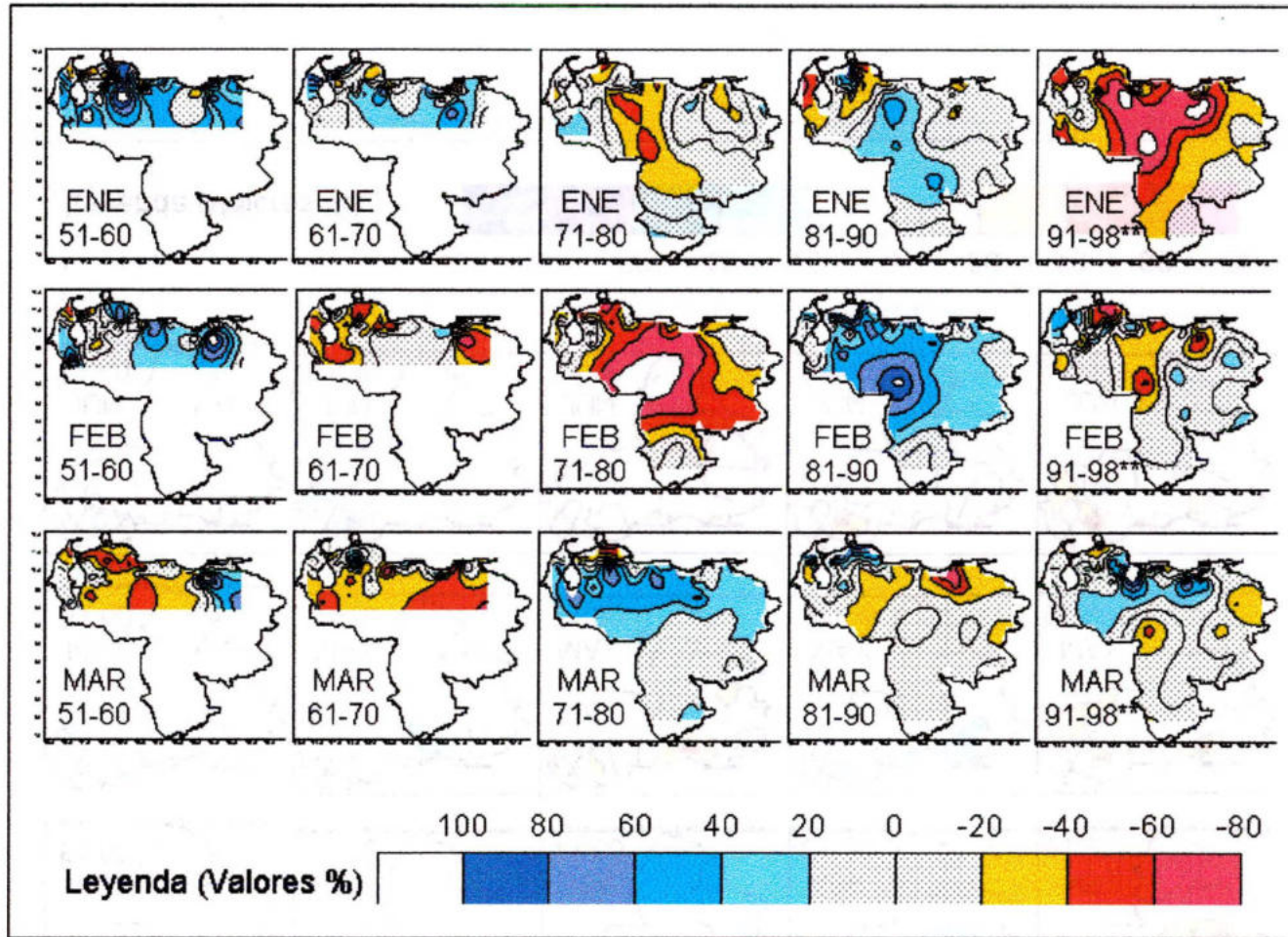


Figura 5.14 Diferencias Porcentuales (%) de los Promedios decadales de Precipitación respecto al Promedio total – enero a marzo

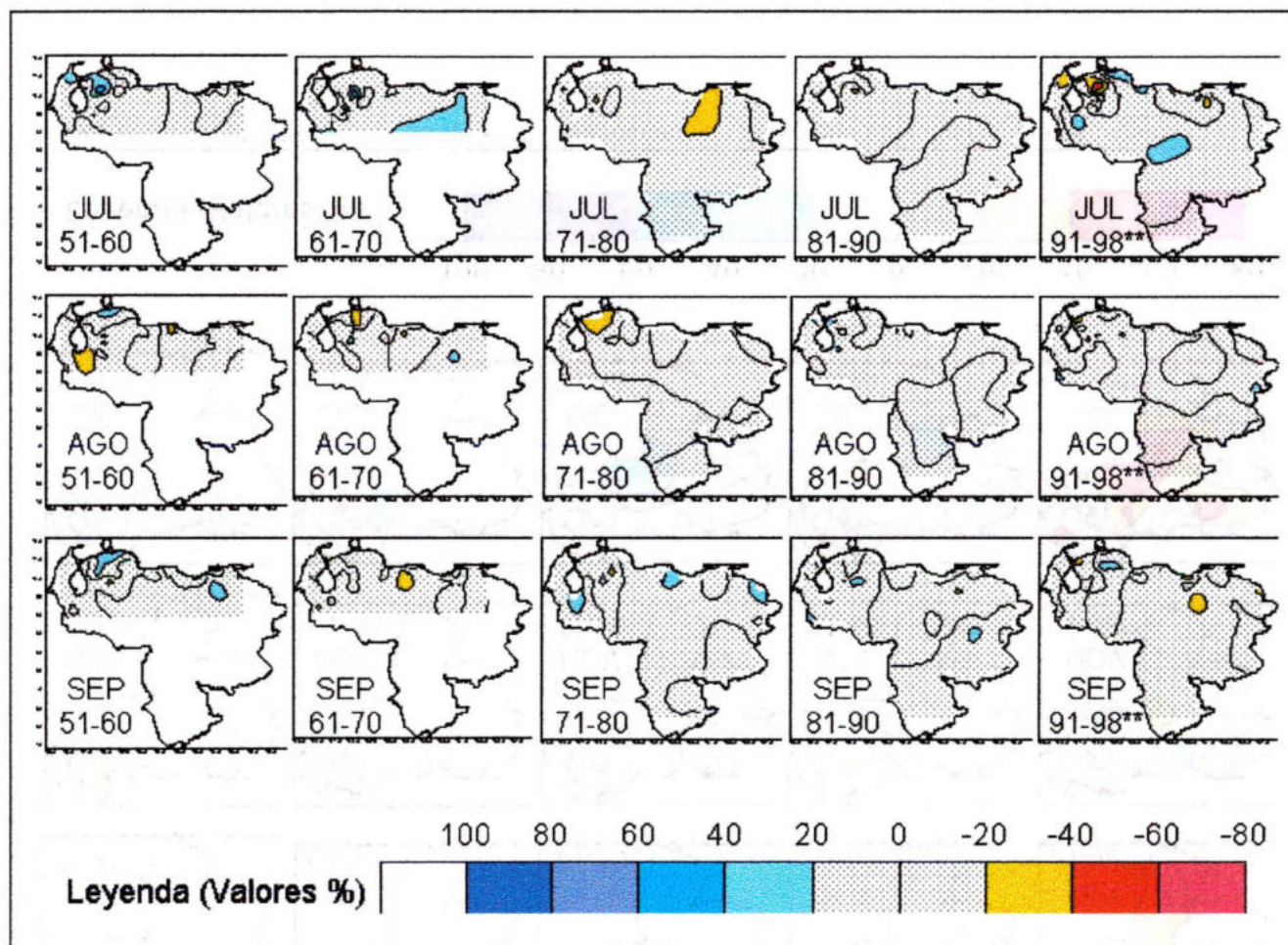


Figura 5.16 Diferencias Porcentuales (%) de los Promedios decadales de Precipitación respecto al Promedio total – julio a septiembre

con DP de -20% a -60% menores al promedio especialmente hacia oriente, en los meses de la temporada lluviosa, mayo y julio, así como en noviembre. Presentó, sin embargo, marzos más lluviosos que el promedio.

La década lluviosa 1981–1990 se caracterizó por febreros, abril y, en la zona norte–costera, mayo, con lluvias mayores al promedio; sólo en marzo se produjeron lluvias muy por debajo del promedio, especialmente hacia oriente y los Llanos occidentales, y en enero hacia el norte de Zulia y la Depresión Lara-Falcón.

La década incompleta 1991–1998**, que aparece para los valores anuales promedio como la más seca en los últimos 49 años, muestra también gran variabilidad espacial; los meses de la temporada seca diciembre, enero y febrero han sido, en promedio, extremadamente secos, así como abril en los extremos oriental y occidental del país; los meses de mayo y junio han mostrado ese mismo patrón, pero más suave. Algunos de los meses, como marzo, han sido bastante más lluviosos que el promedio, mientras que febrero y noviembre se han caracterizado por una gran variabilidad espacial.

En general, las décadas secas (1971–1980 y 1991–1998**) presentaron Diferencias Porcentuales negativas en alguno(s) de los meses de la temporada lluviosa, al menos en alguna(s) zona(s) del país, mientras que en las décadas lluviosas (1961–1970 y 1981–1990), los meses de la temporada lluviosa tienden a ser normales (DP en el rango $+20\%$ a -20%) o más bien húmedos en alguna(s) zona(s) del país. Este resultado es esperable, ya que como se expuso en la distribución espacial de la mediana de precipitación, en los meses de la temporada seca al norte del Orinoco se reciben menos de 50 mm, lo cual no debería establecer una diferencia significativa en el monto anual.

Sin embargo, aunque en temporada seca se recibe muy poca agua y no se esperaría, en principio, que la precipitación recibida en esos meses influyera grandemente a la disponibilidad hídrica, en la vida real sucede lo contrario. El hecho de sufrir temporadas secas más secas que lo normal, tiene impacto en los embalses, que puede extenderse varios meses; generalmente los meses secos son también calientes (a causa de la distribución de la Radiación Neta entre los flujos de calor latente y sensible, cuando la disponibilidad de agua líquida es escasa, la energía se gasta preponderantemente en calentar el aire), por lo que en esas circunstancias aumenta el consumo humano (más baños, más riego de jardines, más aire acondicionado, etc.); si la siguiente temporada lluviosa es sólo normal, ya será difícil recuperar el nivel del embalse; si es ligeramente seca, el efecto puede ser grave, porque se mantendrá un descenso del nivel que puede alcanzar la cota crítica. Otro impacto ambiental grave que puede derivarse de temporadas secas más secas de lo normal es el aumento del riesgo de ocurrencia de incendios forestales. Sería muy interesante evaluar con mayor detalle los impactos de los meses secos y de transición más secos de lo normal.

Otro punto importante que resalta del análisis, es que las Diferencias Porcentuales más extremas, tanto en valor como en extensión espacial, tienden a ocurrir justamente en temporada seca; esto es muy probablemente el reflejo de la problemática de los índices usados para medir variabilidad, que incluyen en su cálculo a la media, como se expuso anteriormente.

porcentaje. Es importante recalcar que en estos Anexos, tanto la media como la mediana son promedios espaciales, ya que se está considerando a todas las estaciones.

Cuadro 5. Medias del número de estaciones en cada categoría de Anomalías clasificadas, según los terciles y según la desviación estándar (valores expresados en Porcentajes %)

Anomalías clasificadas según los terciles												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
-1	73,0	30,1	32,2	31,9	31,4	31,5	31,6	32,4	32,9	32,8	32,9	34,1
0	12,1	34,3	31,8	31,9	30,9	32,6	31,4	33,7	31,8	33,2	32,1	32,2
1	12,8	33,6	34,0	34,2	35,7	33,9	35,0	31,9	33,3	32,0	33,0	31,6
Anomalías clasificadas según la desviación estándar												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	2,4	2,9	5,6	8,0	11,9	12,3	13,3	12,2	14,6	13,7	13,5	9,0
2	62,1	63,8	60,3	53,3	43,9	43,7	41,7	44,3	41,4	42,0	43,1	50,2
3	23,2	20,7	20,1	25,1	29,7	28,0	28,8	28,7	28,0	29,3	27,6	26,2
4	12,2	12,4	13,7	13,5	14,4	15,8	16,0	14,6	15,8	14,9	15,6	14,4

El Cuadro 5 muestra que el número promedio de estaciones en cada una de las cuatro categorías de la clasificación según la desviación estándar está bien diferenciado. En la clase 1 (lluvia muy escasa), hay en promedio, para cualquier mes del año, un porcentaje muy bajo de estaciones, lo que indica que, en general, los eventos muy secos son concentrados espacialmente; asimismo los eventos muy lluviosos (clase 4) tienden a ocurrir, en promedio, concentradamente. Las lluvias normales-excesivas (clase 3) ocurren sobre una extensión superficial ligeramente mayor, ya que en promedio se afectan el 20%-30% de las estaciones, mientras que las lluvias de escasas-normales (clase 2) son las que se manifiestan, en promedio, con mayor extensión espacial, ya que ocurren en el 40%-60% de las estaciones.

En el caso de las tres categorías según los terciles, la situación es diferente. El número promedio de estaciones en cada una de las tres clases es prácticamente equivalente (aproximadamente 33%) en todos los meses, excepto enero (la razón de esta anomalía se explica en el ítem 5.2.3.1). Esto no significa que dicha clasificación es incapaz de discriminar, para un mes de un año en particular, si ocurrieron eventos muy concentrados (o muy dispersos), pero por tener sólo tres categorías es una clasificación gruesa, donde hay muchos eventos no extremadamente secos ni lluviosos que entran en las dos categorías extremas (-1 y 1), por lo que al realizar un promedio sobre varios años se compensan, haciendo aparecer a las tres clases como equivalentes.

El problema práctico que se deriva de lo anterior es el siguiente : internacionalmente, una práctica común para el pronóstico estacional consiste en expresarlo como la probabilidad de que la lluvia esté por encima del promedio, en el rango promedio, o por debajo del promedio, es decir, con base a una clasificación en tres categorías, y además el pronóstico se hace por regiones, no para estaciones en particular. Esto implica que usar el criterio internacional será difícil de implementar en el país, a menos que se conozca con mucho detalle la distribución espacio-temporal de la

una), y un 68% en las clases 2 y 3 (32% en cada una). Sobre la base de estas consideraciones, se tomaron dos umbrales gruesos para definir si los eventos secos o muy lluviosos afectaron de forma generalizada al país o, por el contrario, fueron concentrados espacialmente :

- para la clasificación según los terciles, se asumió evento generalizado si afectó a más del 60% de las estaciones (colores morado y gris en las Figuras 5.18 y 5.19);
- para la clasificación según la desviación estándar, se asumió evento generalizado si afectó a más del 40% de las estaciones (colores verde, morado y gris en las Figuras 5.18 y 5.19).

El Cuadro 6 resume los meses en que se presentaron eventos generalizados de poca lluvia (-1 en la clasificación según los terciles y 1 en la clasificación según la desviación estándar). Nótese que el Cuadro no incluye a los años en que hubo eventos muy secos concentrados espacialmente, en otras palabras, no en todos los años ocurren eventos generalizados.

Cuadro 6. Resumen de los meses con eventos generalizados de poca lluvia (el asterisco en los meses de la Clase 1 indica más de 60 % de estaciones)

Año	Meses Clase -1	Meses Clase 1	Año	Meses Clase -1	Meses Clase 1
1958	Dic		1977	Abr, Dic	Dic
1959	Abr		1980	Mar	
1960	Nov		1982	Nov	Nov
1961	May	May	1983	Mar, Nov	Nov
1962	Abr		1984	May	
1963	Dic		1986	Jul	
1964	Feb, Nov		1988	Abr, May	
1965	Mar		1989	Abr, Jun	
1966	Mar		1991	May, Jul	
1973	May, Jun, Jul	May, Jul	1992	Oct	Oct
1974	Jun, Jul, Dic	Jun*	1993	Oct, Dic	Oct
1975	Jun		1995	May, Nov	
1976	Ago		1997	Abr, May, Ago, Dic	Dic

El hecho de la no ocurrencia de eventos extremos generalizados, sino locales, puede tener gran importancia; podría estar señalando que, en ocasiones, las influencias a escala global e incluso sinóptica del Sistema Climático o bien no se notan, o bien están tan balanceadas que son los efectos locales los que desencadenan los eventos extremos.

Por otro lado, cuanto más locales sean los eventos extremos, aumenta la dificultad para su pronóstico, a menos de contar con una red de pluviógrafos muy densa; por el contrario, el hecho de que los eventos extremos sean generalizados haría, en principio, más fácil el pronóstico estacional, puesto que debería tratarse de eventos relacionados con condiciones a escalas global o sinóptica, y en ambos casos, centros mundiales como la NOAA, involucrados en los Programas Mundiales relacionados con la Vigilancia Atmosférica (el Programa de Vigilancia Meteorológica Mundial, el

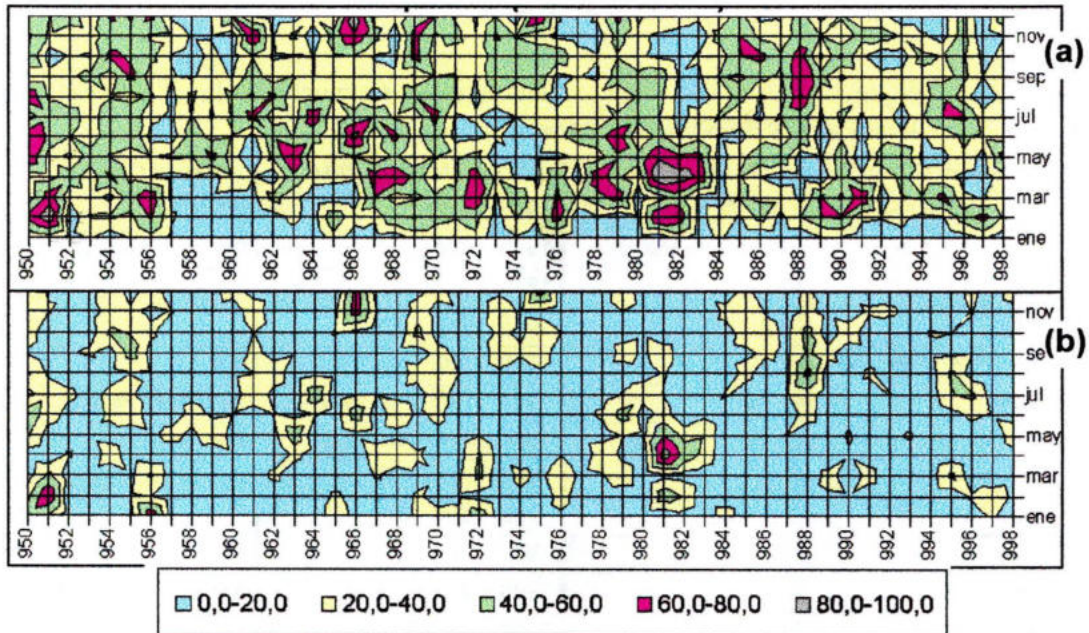


Figura 5.19. Distribución Temporal del Porcentaje de Estaciones en las clases "lluviosas" de las Anomalías Clasificadas de Precipitación : (a) según los terciles, clase 1 (anomalías > P66%) y (b) según la desviación estándar, clase 4 (anomalías > 1 ds)

Los meses de clase 1 según los terciles (lluvia normal a excesiva) que aparecen afectando a una gran proporción de estaciones son, en orden del número de veces en que aparecen : mar (9), feb (8), abr (7), dic (7), may (6), ago (5), oct (5), nov (5), jun (4), jul (4), ene (3) y sep (2). Para la clase 4 según la desviación estándar (lluvia excesiva), los meses con ocurrencias son, en orden : ene (4), mar (3), may (3), oct (3), feb (2), abr (2), jun (2), jul (2), ago (2), sep (2), dic (2), nov (1). Puede verse que en todos los meses se han producido eventos de alta precipitación con gran extensión espacial.

Aquí hay una diferencia significativa respecto de los eventos secos de gran extensión espacial, que aparecen más concentrados entre abril y julio, y luego a final de año en noviembre y diciembre. Al parecer, los eventos lluviosos de gran extensión espacial pueden ocurrir en cualquier momento, lo cual es lógico si se piensa en la diversidad de orígenes de la precipitación; por ejemplo, los que ocurran en enero y febrero pueden probablemente ser la consecuencia de la llegada de más Frentes Fríos de lo habitual o bien de un solo Frente pero de gran intensidad, mientras que los eventos de los meses de la temporada lluviosa pueden deberse a un pasaje de Ondas del Este más alto que lo normal, o a una temporada de huracanes especialmente intensa.

Al relacionar estos resultados con la variabilidad decadal, se observa que en las décadas secas 1971–1980 y 1991–1998** se produjeron pocos eventos generalizados de precipitación excesiva (clase 4 según la desviación estándar), mientras que en las décadas lluviosas 1961–1970 y 1981–

precipitación, como los valores umbrales que tengan impacto en las actividades económicas, a fin de lograr un pronóstico estacional realmente útil.

Cuadro 8. Resumen de "seguidillas" de meses con eventos extremos generalizados espacialmente, según las clasificaciones por los terciles y la desviación estándar.

"Seguidillas" Secas Generalizadas		"Seguidillas" Lluviosas Generalizadas	
Clase -1 de Terciles	Clase 1 de Desv.Est.	Clase 1 de Terciles	Clase 4 de Desv.Est.
Abril-Mayo 1988	—	Enero a Marzo 1951	Enero a Marzo 1951
Abril-Mayo 1997	—	Enero a Marzo 1956	—
Mayo a Julio 1973	—	Febrero-Marzo 1989	—
Junio-Julio 1974	—	Marzo-Abril 1967	—
—	—	Marzo-Abril 1972	—
—	—	Abril-Mayo 1981	Abril-Mayo 1981
—	—	Abril-Mayo 1982	—
—	—	Abril-Mayo 1983	—
—	—	Mayo-Junio 1950	Mayo-Junio 1950
—	—	Julio-Agosto 1961	—
—	—	Sept.-Octubre 1988	Sept.-Octubre 1988
—	—	Octubre- Noviemb.1969	—
—	—	Octubre- Noviemb.1985	—
—	—	Nov.-Diciembre 1966	Nov.-Diciembre 1966

Relacionando las seguidillas con la variabilidad decadal, se observa que 3 de las 4 seguidillas secas se concentran en las décadas secas 71–80 y 91–98**, mientras que sólo hubo una seguidilla lluviosa en la década seca 71—80, todas las demás ocurrieron en las décadas lluviosas 51–60 (3 seguidillas), 61–70 (4 seguidillas) y 81–90 (6 seguidillas). Es muy interesante el comportamiento de la década lluviosa 81–90 : por un lado es la que concentra más seguidillas lluviosas, pero también es la que concentra la única seguidilla seca en una década lluviosa. Esta información refuerza lo que se observó en la descripción de las Diferencias Porcentuales de los promedios decadales, un aumento de la variabilidad espacial de la precipitación. En este sentido, podría especularse que ya en el país se está notando el efecto del Cambio Climático sobre el régimen hídrico, que será muy probablemente, según lo reporta el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2000 a), un incremento de la variabilidad de la precipitación.

5.2.3.2. Distribución espacial de las anomalías en los meses secos y húmedos generalizados

Tal como se definieron los eventos extremos generalizados en el ítem anterior (que afecten a más del 60% de las estaciones en la clasificación por los terciles, o a más del 40% de las estaciones en la clasificación según la desviación estándar), no es posible determinar su distribución espacial.

Dado que este es un trabajo de carácter exploratorio, no se trató de buscar ninguna relación entre estos patrones y las Variables Macroclimáticas, pero probablemente estén relacionados con los campos de viento, puesto que los mapas de meses consecutivos muestran cambios de un mes al siguiente, es decir, tienen un tiempo de respuesta en el orden del mes. Esto corresponde al tiempo que la literatura asigna a los fenómenos atmosféricos, mientras que el efecto de las variables oceánicas se mantiene por un período más largo, debido a la mayor inercia de los océanos.

Este análisis exploratorio del comportamiento de la precipitación en Venezuela, demuestra que la variabilidad de la precipitación tiene una gran cantidad de aspectos que deben ser estudiados en detalle, si se pretende lograr una explicación más completa de la dinámica climática en el país.

Se ha visto que los promedios decadales que señalan a algunas décadas como secas y a otras como lluviosas, se deben realmente a algunos valores de lluvias extremas (muy altas o muy bajas) que ocurrieron quizá en 6 ó 7 meses (de los 120 que componen una década), afectando de modo generalizado a gran parte del país, pero la situación más común, es la ocurrencia de precipitaciones en el rango promedio, que se manifiestan de manera relativamente local.

Esto tiene importancia desde el punto de vista práctico de manejo del recurso hídrico y del pronóstico estacional, ya que implica la necesidad de conocer con detalle local tanto la distribución de patrones de la precipitación como los umbrales de precipitación que tienen efectos significativos sobre las actividades socioeconómicas.

Las VM de los campos de viento en la baja Estratósfera (Oscilación Quasi-Bianual, QBO a 30 y 50 mb), presentan alta correlación entre ellas. Ambas muestran una relación baja, aunque significativa con el campo de viento en la alta Tropósfera (Índice Zonal a 200 mb, ZON200), y relación no significativa con el campo de viento en superficie (Índice del Alisio a 850 mb, ALIS850); se seleccionó la QBO50 porque presenta correlaciones más bajas (repite menos información) con las VM oceánicas, del campo de presión (SOI) y de intensidad de la convección (OLR).

Los campos de viento de la alta Tropósfera (ZON200) y de superficie (ALIS850) también presentan entre ellos alta correlación. En este caso, ALIS850 presenta menores correlaciones significativas (repite menos información) con las demás VM, pero se decidió seleccionar al viento en la alta Tropósfera porque físicamente debe influir más en la dinámica atmosférica que el viento en superficie, que es siempre consecuencia de procesos dados en un gran espesor de atmósfera.

La VM actividad solar se mide a través del número de manchas solares, con el Número de Wolf, que aparece como valor original (WOLF) y como valores suavizados mediante una media móvil (WOLFMN); la correlación entre ellos es muy alta, y se decidió trabajar directamente con los valores originales. Recuérdese que la actividad solar fue la única VM que se trabajó con los valores originales, y no con las anomalías de los valores. En el Cuadro 9 se presenta el resumen de las VM seleccionadas, y en la Figura 5.21 se muestran las áreas para las cuales se calculan las VM oceánicas según los datos satelitales.

Cuadro 9. Variables Macroclimáticas seleccionadas

Tipo de VM	VM	Acrónimo	Valor Utilizado	Ubicación
Temperatura del Océano	Atlántico Tropical Norte	ATNOR	Anomalías de temperatura	5°-20° N – 30°-60° W
	Atlántico Tropical Sur	ATSUR	Anomalías de temperatura	0°-20° S – 10° E-30° W
	Pacífico Ecuatorial (área Niño3)	NI3	Anomalías de temperatura	5° N-5° S – 90°-150° W
	Pacífico Ecuatorial (área Niño3-4)	NI34	Anomalías de temperatura	5° N-5° S – 120°-170° W
Campos de Viento	Oscilación Quasi-Bianual a 50 mb	QBO50	Anomalías de velocidad y dirección	A todo lo largo de la línea ecuatorial
	Índice Zonal a 200 mb	ZON200	Anomalías de velocidad y dirección	5° N-5° S – 110°-165° W
Campo de Presión	Índice Oscilación Sur	SOI	Anomalías de presión	Darwin (Australia) y Tahití
Balance Energético	Radiación Saliente de Onda Larga	OLR	Anomalías de radiación	160° E-180° – 180°-160° W sobre el ecuador
	Número de Manchas Solares	WOLF	Número estandarizado	–

- Campo de Presiones (SOI) : el Índice de Oscilación sur se calcula como la diferencia de presiones entre Tahiti y Darwin (Australia); la situación "normal" en el verano astronómico del hemisferio sur (diciembre), es una baja presión sobre Australia y una alta presión en el Pacífico central, con un SOI positivo, por lo que anomalías positivas señalan alta presión en el Pacífico central, mientras que las anomalías negativas indican baja presión en el Pacífico central. Dada la estrecha interrelación entre las temperaturas del Pacífico y el SOI, a un Pacífico caliente (Niño) le corresponden valores negativos del SOI, ya que durante estos eventos se invierte la posición "normal" de las zonas de alta y baja presión.
- Intensidad de la Convección (OLR) : las anomalías negativas implican convección profunda, ya que al absorber las nubes y el vapor de agua la radiación de onda larga, cuantas más nubes menos Radiación Saliente de Onda Larga capta el satélite; anomalías positivas indican cielos despejados, es decir un proceso de convección muy débil. Recuérdese que esta VM se mide sobre la "pequeña" zona del Pacífico central que abarca 40° de longitud alrededor de la Línea Horaria (entre 160°E-180° y 160°W-180°), en la que, bajo condiciones tipo Niño (Pacífico caliente), se establece una baja presión asociada a lluvias convectivas, por lo cual a tales condiciones le corresponden valores negativos de la OLR.

Como se señaló en el Capítulo 4, Materiales y Métodos, las correlaciones lineales y las cruzadas se calcularon con el software estadístico STATGRAPHICS. En el Anexo 9 se presentan los Gráficos de correlación cruzada para 24 *lags*, entre todas las VM originalmente seleccionadas; a continuación se analizan sólo los rasgos más importantes para el grupo definitivo de VM. Un *lag* positivo indica que la serie 1 lidera a la serie 2 (Statistical Graphic Corporation Inc., 1988), y así por ejemplo, si serie 1 es SOI y serie 2 es NI34, con $r = -0.73$ en *lag* 1, significa que al que aumentar el Índice del campo de presiones, las temperaturas del Pacífico disminuyen el mes siguiente.

Por el contrario, un *lag* negativo indica que la serie 2 lidera a la serie 1; por ejemplo, si serie 1 es ATNOR y serie 2 es NI3, con $r = 0.44$ en *lag* -5, significa que las temperaturas del Atlántico están asociadas, en forma creciente, a las temperaturas que tenía el Pacífico 5 meses antes.

En el Cuadro 10 se presenta el resumen de los valores más significativos encontrados en el análisis, así como cuál serie lidera, y para cuál *lag*. En general, las anomalías de temperaturas del Pacífico (NI3 y NI34) muestran correlación muy significativa ($\alpha = 1\%$ y 5%) con la mayoría de las otras VM, como sigue :

- la VM oceánica ATNOR muestra que el Atlántico Tropical norte se calienta siguiendo el calentamiento originado en el Pacífico 5 meses antes;
- la VM atmosférica ZON200 muestra que el viento en la alta Tropósfera tiende a mostrar altas velocidades del E siguiendo al calentamiento originado en el Pacífico uno ó dos meses antes;
- la VM atmosférica SOI muestra que el Pacífico se calienta el mismo mes, o el mes siguiente, al mes en que se inició el movimiento de la Baja Presión desde Australia hacia el Pacífico central;
- la VM atmosférica OLR muestra que el Pacífico se calienta el mes siguiente al mes en que se inició el aumento de la convección en el Pacífico central.

El comportamiento de ATSUR es complejo. Como ATNOR, ATSUR muestra que el Atlántico Tropical sur se calienta siguiendo el calentamiento originado en el Pacífico 4 meses antes, pero también muestra que si el Atlántico está caliente, 8 meses después el Pacífico se enfriará. Con relación al ZON200, muestra un comportamiento inverso en signo al de los otros océanos, es decir, que el viento en la alta Tropósfera tiende a mostrar altas velocidades del W siguiendo al calentamiento originado en el Atlántico sur ocho meses antes. Con relación a la OLR también tiene un comportamiento inverso, tanto en signo como en cuál variable lidera la respuesta : si el Atlántico sur está caliente, la OLR será débil (tipo Niña) 4 meses después.

Algunas de las VM atmosféricas también muestran correlaciones muy significativas ($\alpha = 5\%$) entre ellas, como sigue :

- la VM ZON200 muestra que el viento en la alta Tropósfera tiende a tener altas velocidades del E siguiendo el aumento de la convección (OLR negativa) iniciado tres meses, así como al movimiento de la Baja Presión desde Australia hacia el Pacífico central (SOI negativo) iniciado un mes antes;
- las VM SOI y OLR tienen correlación creciente en el mismo mes.

La VM QBO50 muestra un comportamiento complejo; con respecto al ZON200, presenta correlación positiva, es decir que la dirección de los vientos fuertes en la baja Estratósfera y en la alta Tropósfera tiende a coincidir, pero parecen existir dos ondas, una de abajo (200 mb) hacia arriba (50 mb), que sería la respuesta de la Estratósfera a las condiciones de la Tropósfera 20 meses antes, y una onda de arriba (50 mb) hacia abajo (200 mb), que sería la respuesta de la Tropósfera, 11 meses después, a las condiciones de la Estratósfera. Con respecto a la OLR, la situación también es compleja : la OLR siempre responde al viento en la Estratósfera, pero de modo inverso, dependiendo del *lag* : si el viento en altura es del E (QBO50 negativa), 6 meses más tarde las condiciones de OLR serán tipo Niño (negativas), pero 18 meses más tarde serían tipo Niña (positivas).

En resumen, las correlaciones más resaltantes pueden resumirse en el siguiente esquema :

NI3, NI34 y ATNOR calientes → SOI y OLR tipo "Niño" (negativos) → ZON200 E (negativo)

ATSUR caliente → OLR tipo "Niña" (positiva) → ZON200 W (positivo)

NI3, NI34 y ATNOR fríos → SOI y OLR tipo "Niña" (positivos) → ZON200 W (positivo)

ATSUR frío → OLR tipo "Niño" (negativa) → ZON200 E (negativo)

En este punto simplemente se presentan los resultados de un procesamiento estadístico, pero no se ofrecen intentos para explicar la relación temporal entre las VM, ya que buena parte del comportamiento dinámico que podría aclararlo aún se desconoce; por ejemplo, se sabe con certeza que el comportamiento de las temperaturas del Pacífico lidera en cierta proporción al de las del Atlántico, y que el tiempo de respuesta del último es de unos 4 meses (Enfield y Mayer, 1997), lo que coincide con estos resultados, pero aún no está claro si el Atlántico influye al Pacífico. Aunque todavía no se comprende completamente el complejo juego de interrelaciones entre las VM, desde el punto de vista práctico del pronóstico estacional es conveniente tenerlo en mente; si por ejemplo se encuentra una VM "x" que aumenta la precipitación, pero esa VM está liderada por

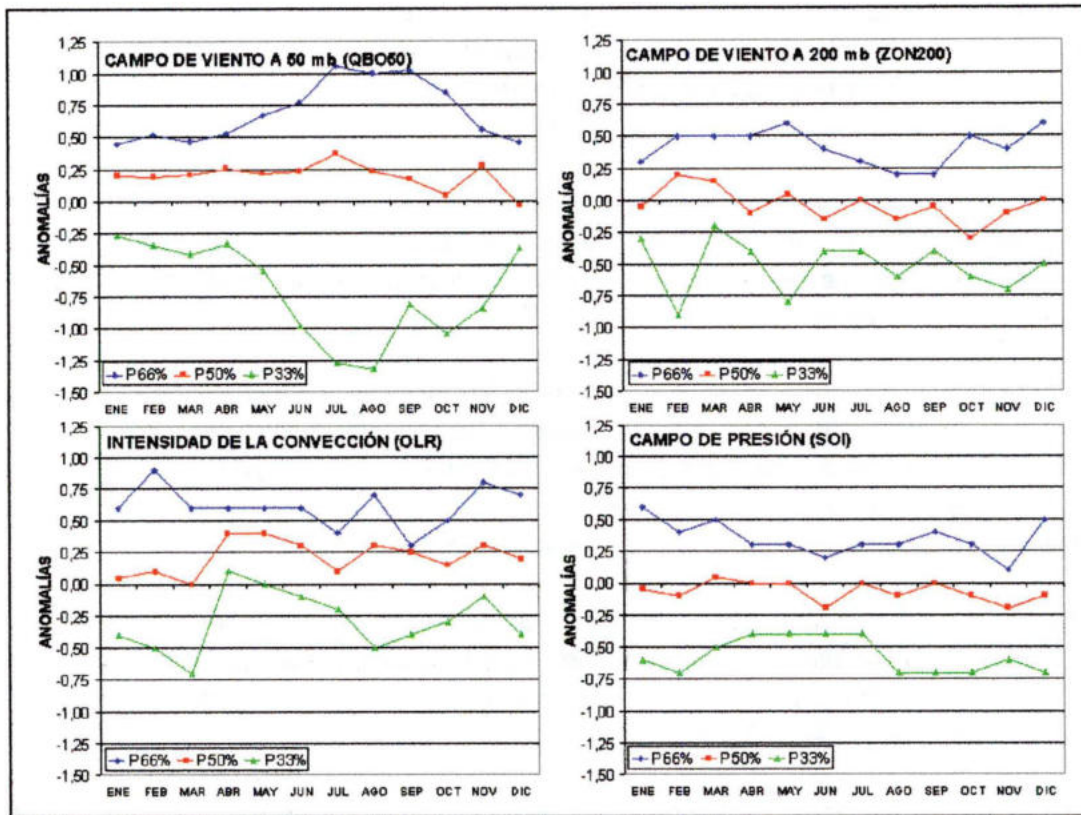


Figura 5.23 Percentiles P33%, P50% y P66% de las Anomalías de las VM de los campos de viento, campos de presiones e intensidad de la convección a través del año

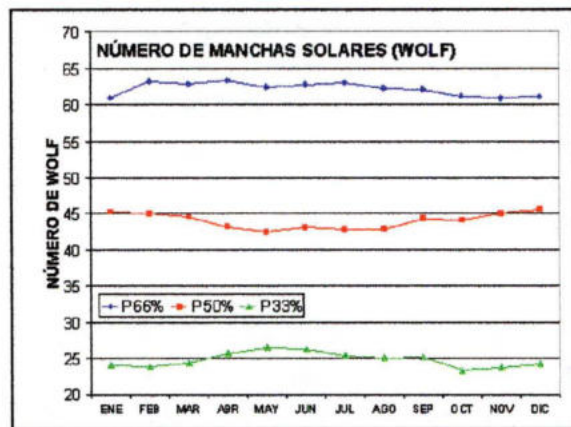


Figura 5.24 Percentiles P33%, P50% y P66% de las Anomalías de las VM manchas solares en el año

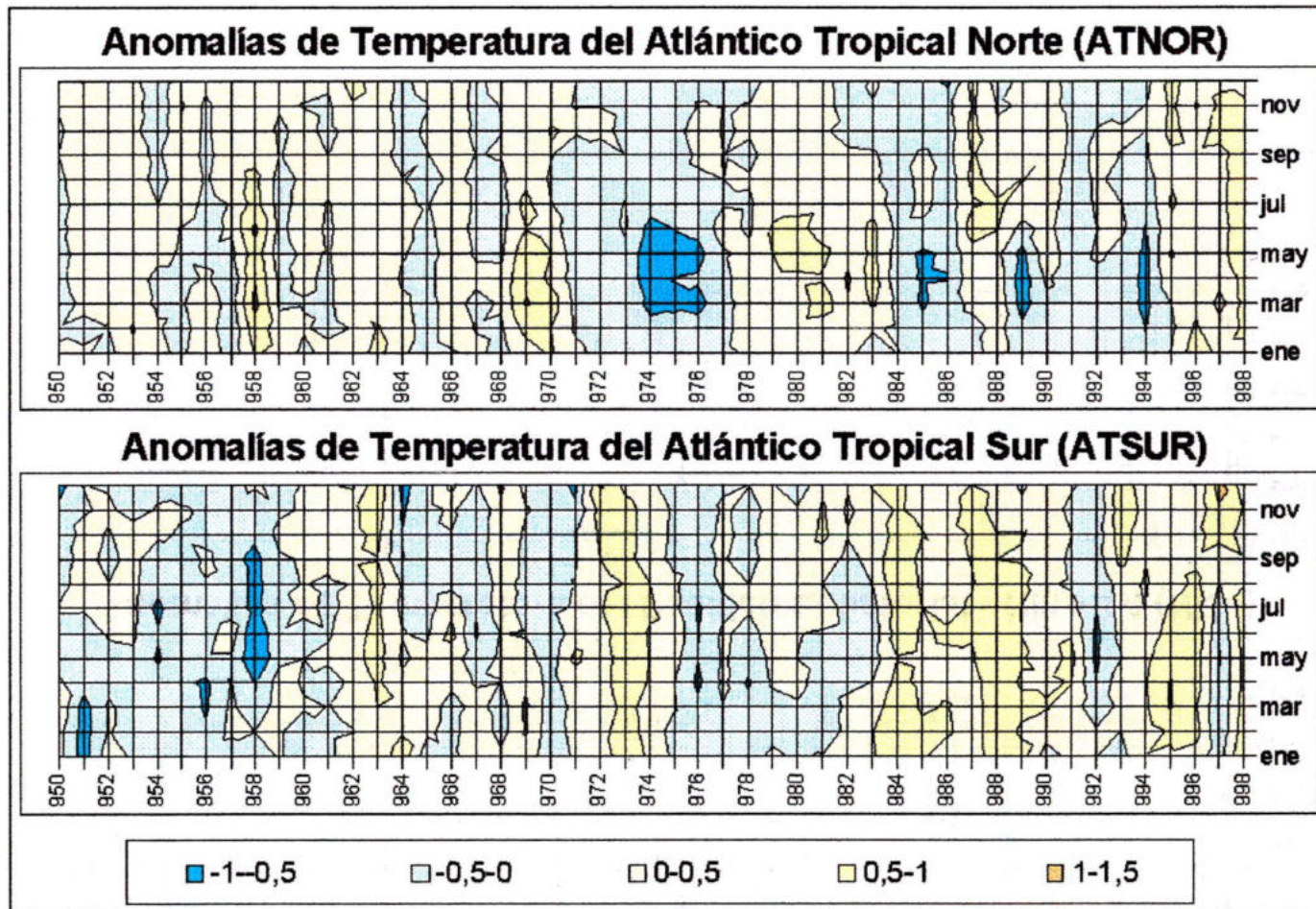


Figura 5.25 Distribución Temporal de las Anomalías de VM oceánicas en el Atlántico (ATNOR, ATSUR)

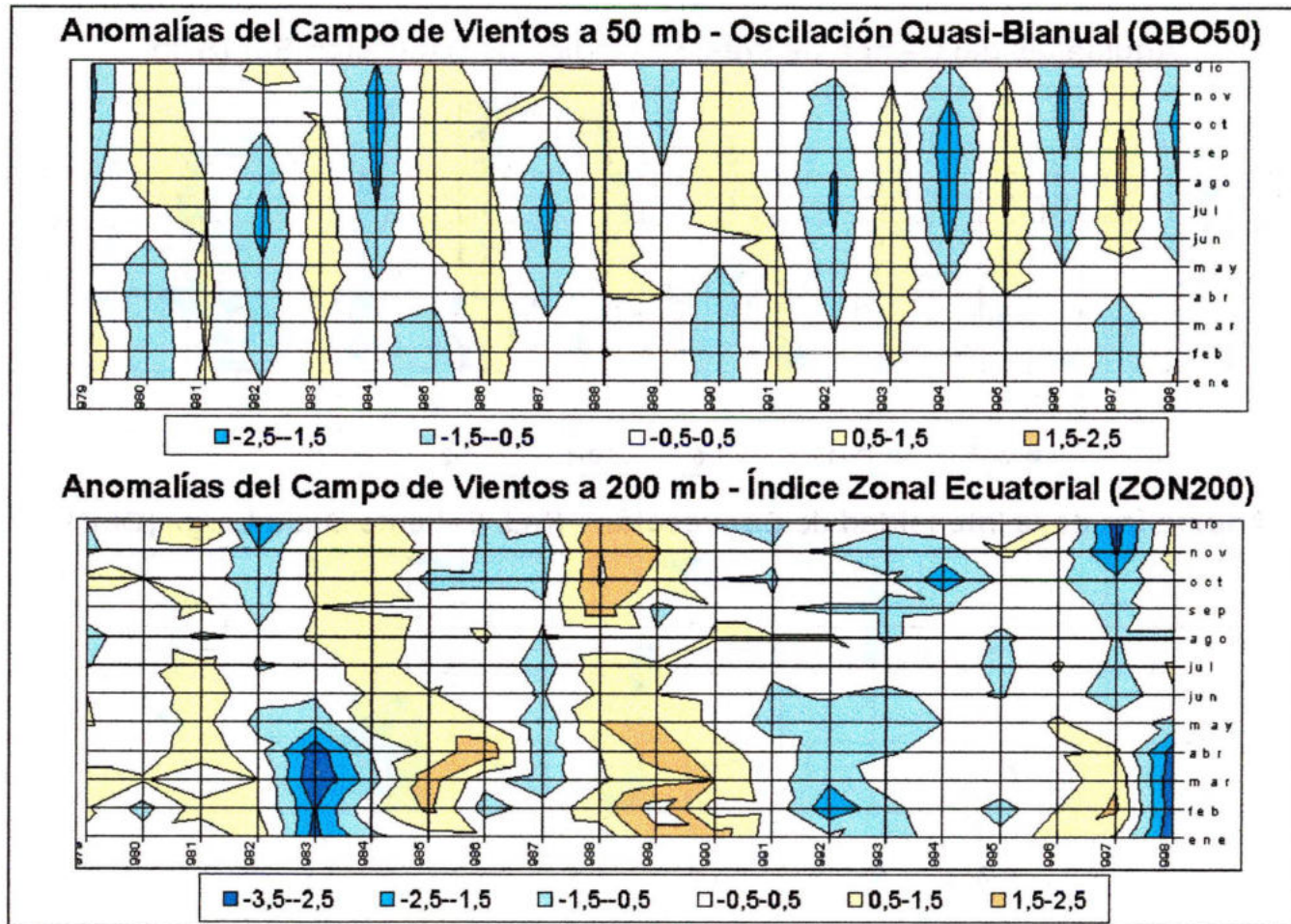


Figura 5.27 Distribución Temporal de las Anomalías de VM Campos de viento en la Baja Estratósfera (QBO50) y Alta Tropósfera (ZON200)

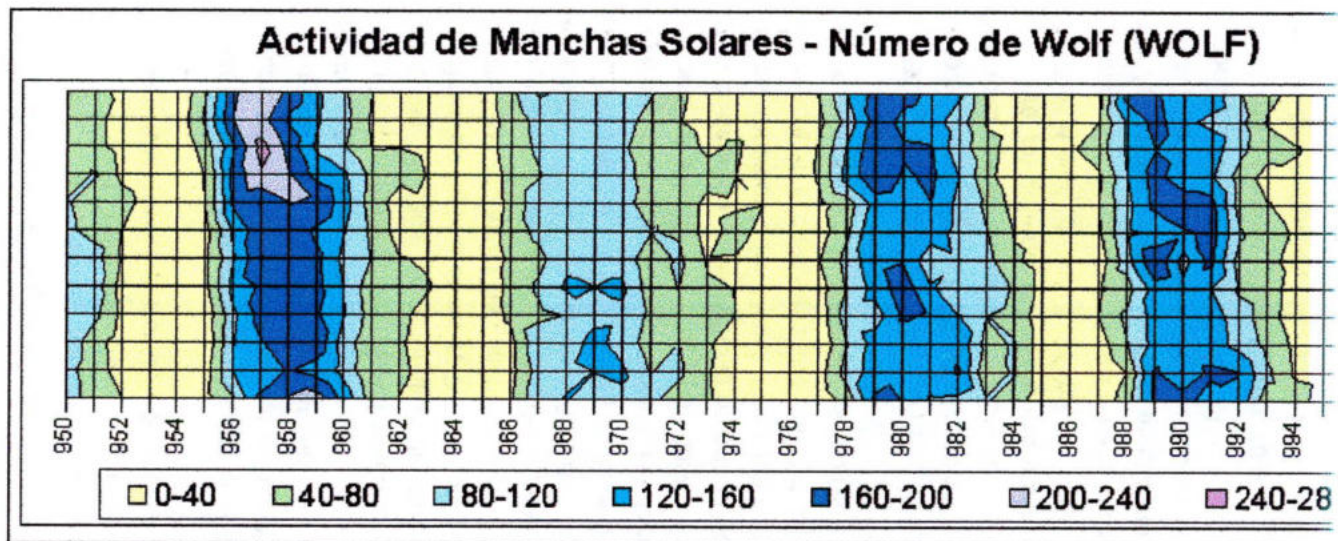


Figura 5.29 Distribución Temporal de las VM manchas solares (WOLF)

décadas del siglo XX el aumento tanto de los valores extremos de las anomalías como de su alternabilidad, y dada la relación entre el SOI y el ENOS, se observa claramente la intensificación de valores negativos del SOI, correspondientes a los valores positivos de NI3 y NI34.

En cuanto a la Intensidad de la Convección (OLR), que se mide desde 1974 y se muestra en la misma Figura, se observa que, en general, las épocas de máxima convección (OLR negativa) en el Pacífico Central coinciden con años Niño (82, 86–87, 91–92 y 97). De los eventos de mínima convección, sólo coinciden con eventos Niña el del año 75 y el de 88–89, pero OLR fue también débil en los meses de invierno (entre noviembre y febrero) de los años 84, 85, 95, 96 y 98, que corresponden a situaciones normales en el Pacífico.

Puede observarse que no siempre se corresponden los SOI negativos (que indican baja presión en el Pacífico Central) con OLR negativos (que indican fuerte convección en la misma zona), y esta es una de las interrogantes sobre el Sistema Climático que aún no tiene respuesta : ¿por qué un área de baja presión, donde el viento está convergiendo, por lo tanto ascendiendo y formando nubes, no se manifiesta con elevada convección? Hace más insólito al hecho, la circunstancia de que se trata de una zona oceánica, es decir, con permanente disponibilidad de agua para evaporar.

En el caso de la actividad solar (WOLF) que se muestra en la Figura 5.29 (nótese que no se trata de anomalías), se observa claramente el ciclo de aproximadamente once años de las manchas solares, con sus respectivas fases de baja y elevada actividad. En este caso, al tratar con los valores originales, a mayor número de manchas solares hay mayor actividad solar; dicha actividad se manifiesta muy claramente en aspectos no climáticos, como el aumento en la cantidad e intensidad de las auroras boreales, así como en su influencia sobre los sistemas de radio y satélites (interrupción de las comunicaciones por "tormentas solares").

En la Figura 5.29, los dos rasgos más evidentes se relacionan ambos con las fases de elevada actividad : la de mediados a finales de los años 50 fue muy fuerte, mientras que la de finales de los años 60 y principios de los 70 fue muy débil.

Es conocido que varias de las VM presentan ciclos en el orden de los dos años; entre ellas están la QBO50 y el evento ENOS, que no se analizó como tal en este trabajo, pero sí a las dos VM que, combinadas, lo manifiestan (la temperatura del Pacífico y el SOI). En vista de dicho conocimiento, se decidió analizar el comportamiento de algunas VM luego de eliminar esta influencia cíclica, para lo cual se calcularon las medias móviles de 24 meses. En las Figuras 5.30 y 5.31 se muestran los resultados para una selección de las principales VM.

En la Figura 5.30 se observa el comportamiento "suavizado" de la VM anomalías de las temperaturas oceánicas para el Atlántico Tropical norte, el Atlántico Tropical sur y el Pacífico Ecuatorial en el área Niño 3–4. Puede verse que ATNOR y NI34 estuvieron en fase aproximadamente hasta finales de los años 70, luego ATNOR comenzó a "retardar" respecto a NI34, y para la década 91–98** estaban desfasados; durante el Niño extremo 97–98 ambos océanos volvieron a estar en fase.

opuesto (OLR creciente, ZON200 y QBO50 decrecientes) y la primera mitad del 83 en fase (las 3 VM crecientes); la QBO50 volvió a desfasarse hasta mediados del 86, incluyendo una total oposición en 84–85; las tres VM volvieron a estar en fase hasta mediados del 89, luego opuestos durante 90–91 y desde entonces han estado, *grosso modo*, en fase.

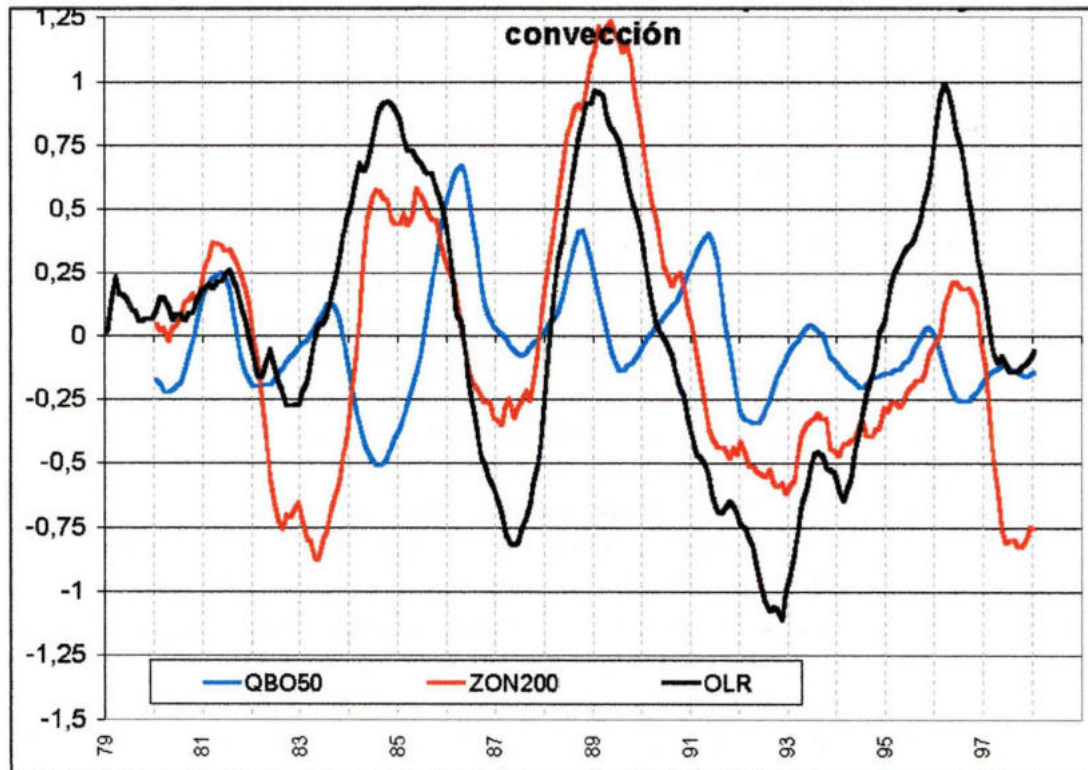


Figura 5.31 Media Móvil de 24 meses de las Anomalías de las Variables Macroclimáticas Campos de viento (QBO50, ZON200) e Intensidad de la Convección (OLR)

Como se puede observar, es difícil analizar el efecto de las VM sobre la precipitación, puesto que hay que considerar no sólo la influencia de cada variable por separado, sino también las relaciones entre ellas. El problema se complica por el hecho de que muchas de las variables son cíclicas, con períodos diferentes y que cambian a lo largo de los años, bien sea en sus valores o en la "alternabilidad", por lo que hay que considerar no sólo el valor de la variable sino también si está en fase u opuesta a otra variable, y si está presentándose en ciclos más cortos o largos que lo normal, entre otras cosas.

Para tener una primera relación numérica, muy gruesa, del comportamiento de la precipitación en función del comportamiento de las VM, se calcularon las correlaciones lineales entre los promedios anuales de cada VM y los promedios espaciales del monto anual de precipitación al norte y al sur del Orinoco. En el Cuadro 11 se resumen los resultados :

Para cada una de las 67 estaciones al norte del Orinoco con período de registro de 49 años, las correlaciones con las VM oceánicas, SOI y WOLF se calcularon con base a 588 pares de observaciones, correspondientes a 49 años x 12 meses, mientras que las estaciones al sur del Orinoco, cuyo registro es de 30 años, se basaron en 360 pares de observaciones (30 x 12). Las correlaciones con las VM de Campos de viento se calcularon con 240 pares de observaciones, ya que sólo cuentan con un registro de 20 años, y las correlaciones con la OLR se obtuvieron de 300 pares de observaciones, ya que su registro es de 25 años. Debido a los datos faltantes de precipitación, las series tienen un número ligeramente menor de pares de observaciones, y dado que cada estación de precipitación tiene un número de observaciones particular, según sus datos faltantes, los valores significativos de r son también particulares para cada una, en la correlación con cada VM. Para simplificar, se asumió el peor caso posible, el máximo de 15% de datos faltantes que se usó como criterio de selección de las estaciones, y se obtuvo :

- $588 * 0.15 = 88.2$ $588 - 88.2 = 499.8$, aproximadamente 500
- $360 * 0.15 = 54$ $360 - 54 = 306$, aproximadamente 300
- $240 * 0.15 = 36$ $240 - 36 = 204$, aproximadamente 200
- $300 * 0.15 = 45$ $300 - 45 = 255$, comprendido entre 200 y 300

Con base a estos tres números de pares de observaciones (500, 300 y 200) se calcularon los r significativos. Los datos de todas las correlaciones, con sus respectivos números de pares de observaciones, se muestran en los Anexos 11 (norte del Orinoco) y 12 (sur del Orinoco). En el Cuadro 12 se resumen los coeficientes de correlación (r) significativos para los niveles de 5% y 10% de probabilidad, calculados en el primer caso según el estadístico F de Fischer (Mead y Curnow, 1983), y en el segundo caso con el estadístico t de Student (Bonnier y Tedin, 1966).

Cuadro 12. Valores del Coeficiente de Correlación (r) significativos al 5% y al 10% de probabilidad, para tres números de pares de observaciones de las series

Pares de observaciones en las Series	Probabilidad 5 %	Probabilidad 10%	Variables Macroclimáticas	Longitud de registro de Precipitación
500	0.088	0.074	ATNOR, ATSUR, NI3, NI34, SOI y WOLF	49 años (norte del Orinoco)
300	0.113	0.095	ATNOR, ATSUR, NI3, NI34, SOI y WOLF	30 años (sur del Orinoco)
300	0.113	0.095	OLR	25 años
200	0.139	0.117	QBO50 y ZON200	20 años

El Cuadro 12 indica que, para tener el mismo nivel de significancia que las estaciones al norte del Orinoco, aquellas al sur del Orinoco deben presentar mayores valores de r , debido a su menor período de registro. El mismo criterio se aplica para las VM de menor registro, por lo que para un mismo mapa de correlaciones, por ejemplo SOI, un área continua desde el norte al sur del país con $r = 0.09$, será significativa al 5% al norte, pero no será significativa, ni siquiera al 10%, al sur. En general, los valores de $r > 0.117$ son significativos al 10% de probabilidad, tanto al norte como al sur, para todas la VM analizadas.

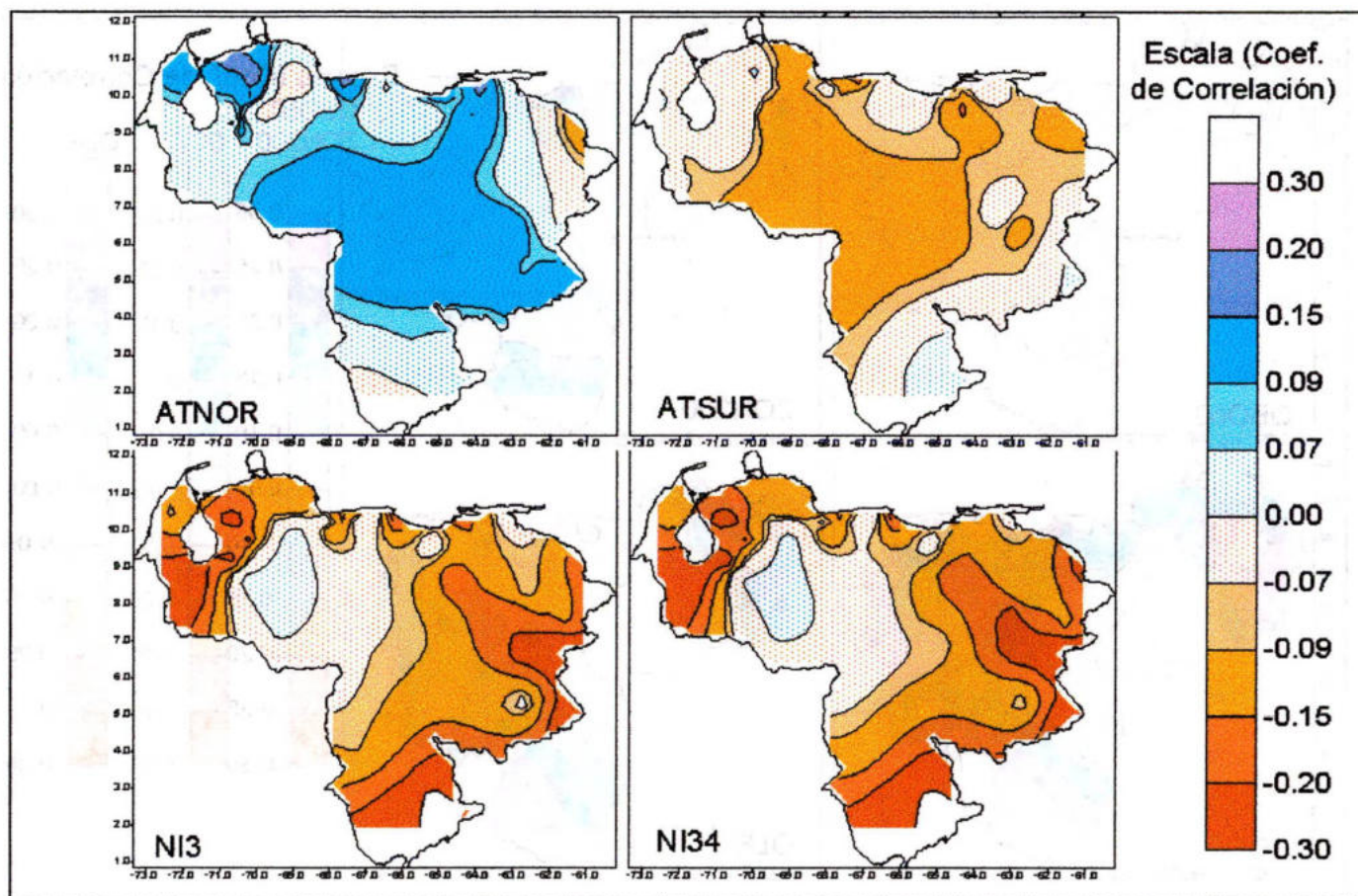


Figura 5.32 Distribución Espacial de los Coeficientes de Correlación entre las Anomalías de Precipitación y las Anomalías de la VM Temperatura oceánica para el Atlántico Tropical Norte (ATNOR), Atlántico Tropical Sur (ATSUR), y Pacífico Ecuatorial en las áreas Niño3 (NI3) y Niño3.4 (NI34), para el lag 0

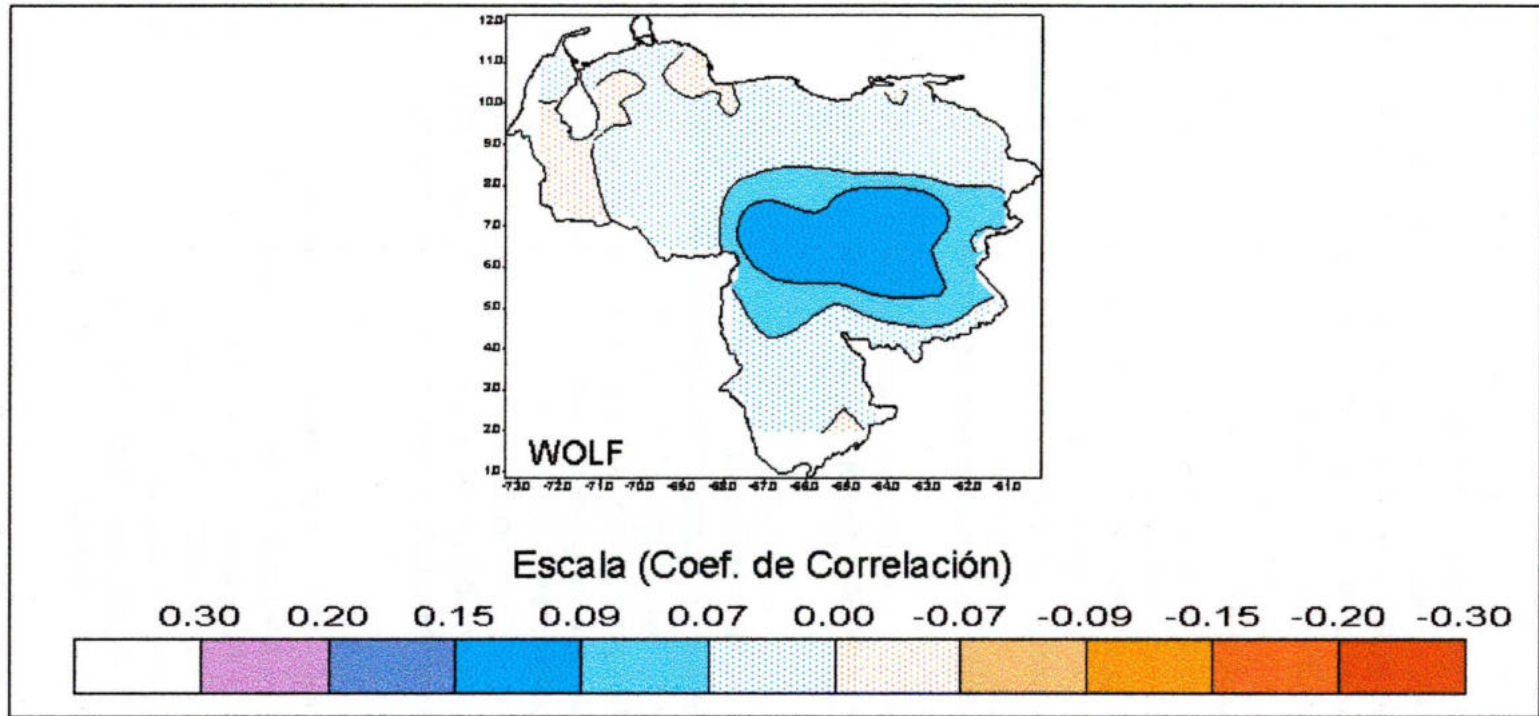


Figura 5.34 Distribución Espacial de los Coeficientes de Correlación entre las Anomalías de Precipitación y los valores originales del Número de Manchas Solares (WOLF), para el lag 0

que a mayores velocidades del viento del Oeste aumenta la precipitación, y la influencia se concentra en el extremo sur de Amazonas, parte NE de Bolívar y el Delta. En el norte del país, las zonas influenciadas son Cuenca de Unare, Barlovento, centro y SW de Zulia y Piedemonte Andino vertiente del Lago de Maracaibo.

En cuanto a las correlaciones entre la precipitación y las manchas solares (WOLF), que se observan en la Figura 5.34, la única zona que aparece con correlaciones significativas positivas (más actividad solar implica más lluvia) es el norte de Amazonas y Bolívar.

En general, son las fachadas oriental y occidental del país, así como el centro y sur de Amazonas, las regiones donde se concentra la influencia de la mayoría de las VM analizadas, mientras que hacia la zona norte-costera la influencia de las VM presenta mayores discontinuidades, lo cual puede ser debido a efectos topográficos locales, tal como fue claramente visible en el caso de la Cuenca media del Caroní en la estación Urimán. Para los Llanos centrales y occidentales, por el contrario, sólo dos VM (ATNOR y ATSUR) presentan una influencia significativa.

Es interesante observar que una misma VM, por ejemplo NI3, afecta con el mismo signo a regiones del país con orígenes diferentes de la precipitación: independientemente de que se trate del sur del paralelo 4° N, donde siempre actúa la ZCIT, o del oeste del meridiano 70° W, donde el patrón de lluvia es bimodal, en esas zonas un Pacífico caliente tiende a producir menos lluvia. Esta consideración hace necesario tratar de definir si la influencia de la VM es uniforme a lo largo del año o, por el contrario, presenta variaciones estacionales. En efecto, para poder comprender por qué en lugares con diferentes regímenes de precipitación la influencia de la VM es similar, deberíamos ser capaces de definir sobre cuál(es) de los mecanismos que producen (o inhiben) la lluvia está actuando dicha VM, y el primer paso para ello es ver si la influencia se concentra en la época seca o en la época lluviosa.

5.3.3. Análisis de la Relación Temporal entre la Precipitación y las VM

Una vez determinado, a través de las correlaciones con las Series de Tiempo, que las VM influyen a la lluvia en diferentes áreas de Venezuela, se analizó si a lo largo de todo el año las VM ejercen el mismo tipo de efecto, o lo cambian estacionalmente. Para ello se calcularon los Coeficientes de Correlación lineal por mes entre la precipitación y las VM, para 5 diferentes *lags* (0, -1, -2, -3 y -4). Este análisis permite verificar la posibilidad de contar con indicadores para el pronóstico con un mes o más de anticipación. Por ejemplo, la lluvia de enero se correlacionó con las VM de enero (*lag* 0), diciembre del año anterior (*lag* -1), etc.

Para calcular las correlaciones se utilizaron los archivos en Formato "Todas", tanto de las anomalías de precipitación como de las VM. En el Anexo 12 se muestran los coeficientes de correlación para cada mes de cada VM, y su distribución en el año en las Figuras 5.35 a 5.37. Dados los resultados discutidos en el ítem anterior sobre la variación en el nivel de significancia de las correlaciones dependiendo del número de pares de observaciones de las series, para el

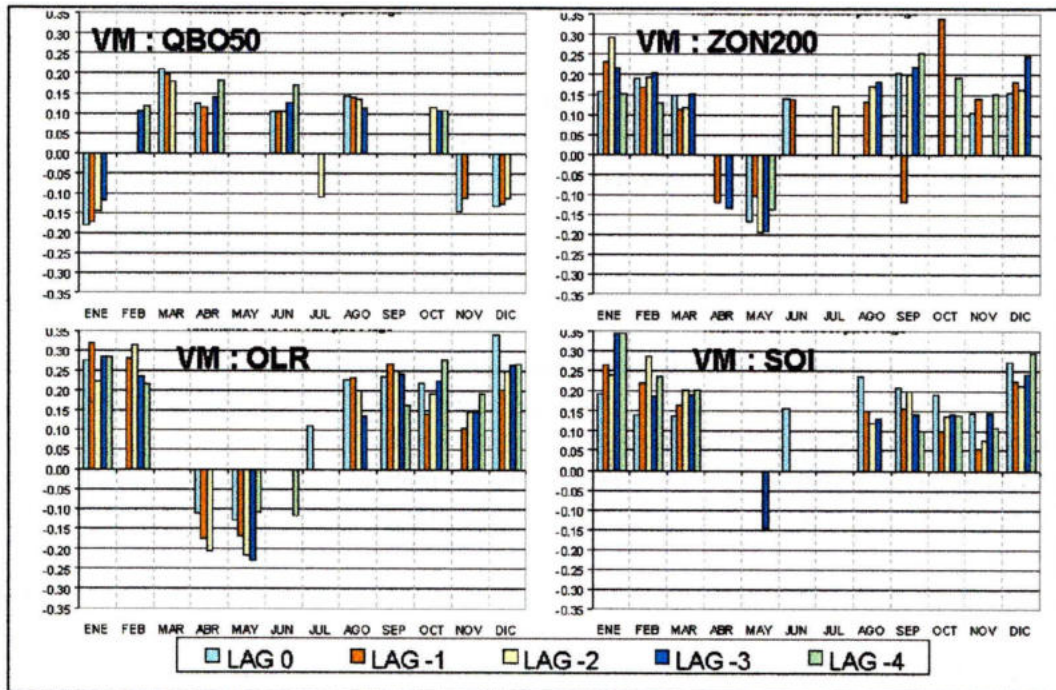


Figura 5.36 Coeficientes de Correlación por mes entre las Anomalías de Precipitación y las VM Campos de viento (QBO50, ZON200), Campos de Presión (SOI) e Intensidad de la Convección (OLR) para 5 lags

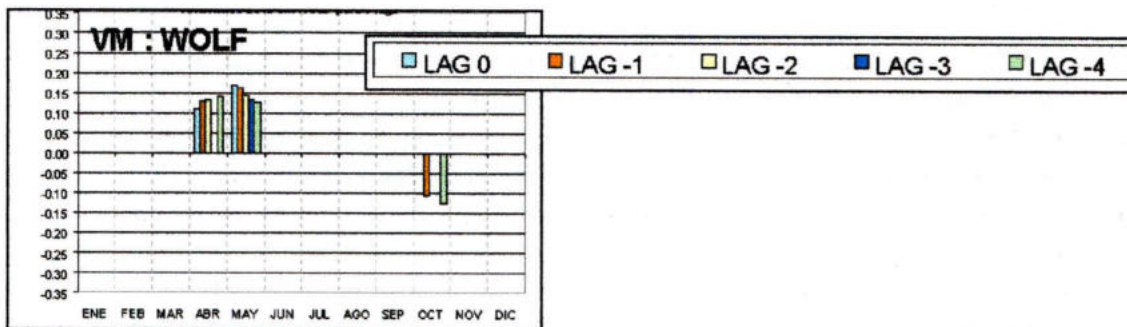


Figura 5.37 Coeficientes de Correlación por mes entre las Anomalías de Precipitación y la VM Número de Manchas Solares (WOLF) para 5 lags

Es importante recalcar que las correlaciones que se analizan en este ítem son "espaciales", en el sentido de que se está calculando la correlación para todas las estaciones entre la lluvia en un mes y la VM de ese mes y los 4 meses previos, mientras que en el ítem anterior, aunque se obtuvieron mapas de los Coeficientes de Correlación, se trataba de correlaciones "temporales", ya que se calcularon para cada estación usando los datos de todos los meses. En otras palabras, el análisis del ítem anterior indica, por ejemplo, que NI3 está relacionado negativamente con la lluvia en la Gran Sabana, pero no señala en que meses se da realmente esta relación. En el análisis que

enero (-0.15 a -0.20). Los meses en los que aparecen al menos dos *lags* consecutivos con valores similares de *r* y de signo son diciembre, enero, marzo, junio y agosto, para los *lags* -1 y -2.

En el caso de esta VM es interesante observar que en el análisis de las distribuciones espaciales de las correlaciones, fue la única que no mostró valores significativos en ninguna región del país; es probable que la causa sea lo que se observa en estos resultados, ya que presenta 6 meses del año correlaciones positivas, 4 meses del año correlaciones negativas y 2 meses del año son no significativas, además de que los valores de *r* son, en todos los casos, relativamente pequeños. Sería muy interesante, para esta VM en particular, realizar las correlaciones estación por estación y mes a mes, para verificar si efectivamente no ejerce efecto o, por el contrario, ejerce un efecto espacial y temporal bien diferenciado, pero que al analizarlo en conjunto se "elimina".

El viento en la alta Tropósfera (ZON200) presenta en general correlaciones positivas (vientos fuertes del oeste implican más lluvia) en casi todos los meses, pero con mucha inestabilidad; aquellos en los que la correlación es más "segura", en el sentido de que presentan valores de *r* y signo similares en casi todos los *lags* son enero, febrero y marzo, y luego en agosto y diciembre, donde hay al menos 3 *lags* consecutivos con un comportamiento similar. Las correlaciones son negativas sólo en dos meses del año, abril y mayo; en septiembre se presenta el caso de un *lag* con correlación negativa, mientras los otros 4 son positivos. Los mayores valores de *r* se presentan en enero (0.25 a 0.30) y en mayo (-0.15 a -0.20).

En el caso de los Campos de Viento es difícil determinar si la alternancia en el signo de la correlación de un mes al siguiente, o entre *lags*, son problemas de la serie o no; la atmósfera responde generalmente en el orden de un mes, por lo que es posible que para este grupo de VM la alternancia en el signo de las correlaciones si esté reflejando situaciones reales.

El campo de presiones (SOI) muestra su estrecha relación con el Pacífico entre agosto y marzo, cuando al continuo de correlaciones negativas en NI3 y NI34, corresponde el continuo de correlaciones positivas del SOI. Como en el Pacífico, también el SOI muestra correlaciones que van disminuyendo entre agosto y noviembre, para saltar bruscamente en diciembre a valores de $r > 0.25$. En abril, junio y julio las correlaciones son no significativas (la única significativa, positiva, es en junio la del *lag* 0, que no es útil para pronóstico). En mayo aparece una correlación negativa, pero sólo para un *lag*. Esta VM, junto con NI3 y NI34, es la que presenta coeficientes de correlación más altos, alcanzando en enero valores entre 0.30 y 0.35.

La Intensidad de la Convección (OLR), presenta un patrón relativamente parecido al del SOI (como se vio en el Cuadro 10, la correlación entre estas dos VM es de 0.49). Presenta correlaciones positivas (mayor convección en el Pacífico central significa más lluvia) entre agosto y febrero, los menores valores de *r* en noviembre y el aumento brusco de los valores en diciembre. En marzo, como ocurre en el Atlántico, la correlación se hace no significativa, y en abril y mayo, como en ZON200, cambia el signo a negativo; Junio y julio presentan un comportamiento inestable. Entre enero y febrero se encuentran valores de *r* entre 0.30 y 0.35, y en mayo de -0.20 a -0.25.

Cuadro 13. Ejemplos de Tablas de Contingencia 3x3 entre la lluvia de Junio y la VM ATNOR para dos lags.

		ATNOR6			Total general	CHI ²	SIGNIF.
JUN		-1	0	1			
-1		47.37	27.78	24.83	100	9.005	0.0292
0		34.95	33.98	31.06	100	0.246	0.9698
1		22.75	36.13	41.10	100	5.404	0.1445
Total general		34.73	33.00	32.26	100	14.65	0.0231

		ATNOR5			Total general	CHI ²	SIGNIF.
JUN		-1	0	1			
-1		50.90	23.93	25.16	100	13.9	0.0030
0		35.44	31.06	33.49	100	0.28	0.9621
1		20.35	39.34	40.30	100	7.59	0.0551
Total general		34.75	33.27	31.96	100	21.79	0.0013

El Cuadro indica que si en una celda en particular, por ejemplo lluvia escasa (clase -1) con ATNOR frío (clase -1) aparece un porcentaje de casos 50.9%, hay significancia estadística que relaciona al ATNOR frío en mayo con lluvias escasas en junio. Es importante señalar que esto no implica necesariamente lo contrario, es decir, que ATNOR caliente significa lluvias abundantes, al menos para el nivel estadísticamente significativo de $\alpha = 10\%$. La razón es la no linealidad de muchas de las interacciones en el Sistema Climático, por lo que no es "automáticamente" esperable que condiciones opuestas del comportamiento de las VM produzcan reacciones contrarias en el comportamiento de la precipitación.

Sólo si la celda "complementaria", la de lluvias abundantes (clase 1) con ATNOR caliente (clase 1) muestra un alto porcentaje de casos, se tendría la seguridad de que efectivamente la temperatura del Atlántico Tropical norte produce un efecto sobre la lluvia en las dos direcciones (océano frío significa menos lluvia y océano caliente significa más lluvia). Se observa que ese no es el caso para el porcentaje de casos de lluvias abundantes en junio asociadas a un ATNOR caliente en mayo, que es de 40.3% (no supera el valor límite de 45.8%, aunque la tendencia es a un número grande de casos).

Otra observación interesante en el Cuadro que sirve de ejemplo, es que el porcentaje de lluvias abundantes (clase 1) asociadas a un océano frío (clase -1) es significativamente bajo (menor que 20.8%), por lo que se puede asegurar que en junio, si ATNOR estuvo frío en mayo, es probable la ocurrencia de lluvias escasas y poco probable la ocurrencia de lluvias abundantes.

En general, del análisis de las tablas de contingencia puede concluirse que en la enorme mayoría de los casos, la fila correspondiente a la lluvia normal (clase 0), presenta el porcentaje esperado de casos, entre 20.8% y 45.8%, para las tres condiciones de la VM, lo que indica que son los valores extremos de lluvia, por encima y por debajo, las que se ven más influenciadas por las VM. Asimismo, la columna correspondiente a las VM en el intervalo normal (clase 0, es decir, océanos

Los análisis previos de variabilidad de la precipitación y de su distribución en clases señalan que los eventos extremos generalizados espacialmente no son muy frecuentes. Asimismo, los análisis de distribución espacial de los coeficientes de correlación de la precipitación con las VM muestran concentración espacial. En vista de estas dos circunstancias, y siguiendo con el ejemplo, es más probable que esa alta proporción de casos (50.9%) se deba a la primera situación señalada, es decir, que las lluvias escasas ocurren en muchos de los junios, si ATNOR estuvo frío en mayo, concentradas espacialmente en las zonas de influencia de ATNOR señaladas en los mapas anteriormente.

Desde el punto de vista práctico del pronóstico estacional esto tiene una importancia fundamental; sólo en el caso de que exista una "estabilidad" temporal en la respuesta de la lluvia a ciertos umbrales de las VM, es posible obtener ecuaciones con buen potencial de pronóstico. Si la situación es que se tiene una respuesta generalizada de la lluvia en el espacio, pero muy irregular en el tiempo, quizá puedan obtenerse buenas ecuaciones en la muestra de calibración, e incluso en la de validación, pero no serán de utilidad práctica en el pronóstico. Asimismo, esto evidencia la necesidad de regionalizar los pronósticos, es decir, es difícil que una sola ecuación predictiva pueda tener un buen resultado al nivel nacional.

Al analizar las 540 tablas de contingencia 3x3 del Anexo 14, se observa que existen porcentajes significativos al 10%, de lluvias extremas asociadas a los valores extremos de las VM en prácticamente todos los meses, en los diferentes *lags*. Cuando se trate de encontrar ecuaciones para el pronóstico estacional, deberán considerarse todos ellos, así como su interacción. Sin embargo, para tratar de simplificar un poco el análisis en este nivel exploratorio, a continuación se presenta un resumen de las filas de las diferentes tablas de contingencia que presentan valores significativos para $\alpha = 0.1\%$, para las lluvias extremas escasas (clase -1) y excesivas (clase 1), en los Cuadros 14 y 15, respectivamente.

En dichos cuadros, el nombre de la VM incorpora un número que representa al mes para el que se calcula la tabla de contingencia; así por ejemplo, "OLR1" significa OLR en el mes 1, es decir enero; "NI3412A" significa NI34 en diciembre del año Anterior, etc. En estos Cuadros, para las VM del Campo de Vientos se simplificaron los nombres eliminando el "50" de QBO50 y el "200" de ZON200, quedando por ejemplo, "QBO8", que significa QBO50 en el mes 8 (agosto) y "ZON9", que significa ZON200 en septiembre. Se señalan en color las celdas específicas que sobrepasan los umbrales significativos de los porcentajes (20.8% y 45.8%).

Análisis de las lluvias escasas (Clase -1) según los terciles.

Analizando el Cuadro 14, se observa que para la clase de lluvias escasas (-1) según los terciles, se encuentran porcentajes de casos significativos al 0.1% de relaciones con las VM en casi todos los meses, excepto enero y noviembre. Antes de comenzar el análisis, recordaremos lo que significan las clases -1, 0 y 1 para cada una de las VM utilizadas en el trabajo :

- ATNOR, ATSUR, NI3 y NI34 : -1 océano frío, 0 normal, 1 océano caliente;
- QBO50 y ZON200 : -1 viento fuerte E, 0 viento débil en cualquier dirección, 1 viento fuerte W;

Cuadro 14. Resumen de las Tablas de Contingencia 3x3 significativas al 0.1% para la clase de lluvia -1 (escasas) según la clasificación por los terciles (Porcentajes de casos)

Mes	VM	Clase de VM			χ^2	Nivel de Signif.
		-1	0	1		
FEB	NI310A	22.79	27.72	48.85	11.49	0.0093
	NI341	17.34	38.73	43.92	11.91	0.0077
	NI3412A	19.10	33.36	46.91	11.61	0.0088
	ZON12A	51.14	33.79	15.06	19.52	0.0002
	ZON11A	56.16	25.34	18.49	24.16	0.0000
	ZON10A	50.00	26.71	23.28	12.67	0.0054
	OLR1	63.96	20.61	15.42	42.61	0.0000
	OLR12A	49.82	40.21	9.96	25.95	0.0000
	OLR11A	46.08	41.99	11.92	20.88	0.0001
	OLR10A	57.82	27.04	15.12	29.13	0.0000
	SOI1	47.62	41.37	11.00	23.02	0.0000
	SOI12A	48.59	32.48	18.30	13.77	0.0032
	SOI10A	45.07	37.23	17.07	12.51	0.0058
MAR	QBO11A	28.70	50.09	21.19	13.49	0.0037
	ZON12A	49.90	33.14	16.95	16.28	0.0010
	OLR1	47.90	14.40	37.68	17.68	0.0005
ABR	QBO3	35.41	47.88	16.69	14.78	0.0020
	QBO2	33.02	50.27	16.69	16.91	0.0007
	QBO12A	25.84	49.43	24.71	11.69	0.0085
	OLR3	37.67	17.76	44.56	11.62	0.0088
MAY	QBO3	27.50	52.25	20.23	16.91	0.0007
	ZON1	20.62	53.83	25.54	19.26	0.0002
	SOI1	29.10	51.37	19.51	16.02	0.0011
JUN	ATNOR5	50.90	23.93	25.16	13.91	0.0030
	ATNOR3	49.01	31.14	19.83	12.98	0.0047
JUL	OLR6	51.04	23.95	25.00	14.13	0.0027
	OLR5	30.27	50.08	19.64	14.31	0.0025
AGO	ZON5	42.38	40.55	17.06	11.96	0.0075
	OLR6	57.35	24.51	18.12	26.57	0.0000
	OLR5	37.30	50.61	12.07	22.98	0.0000
SEP	ZON6	40.12	43.00	16.87	12.31	0.0064
	ZON5	46.09	39.71	14.19	17.08	0.0007
	OLR8	48.57	34.95	16.47	15.57	0.0014
	OLR7	49.57	29.41	21.00	12.93	0.0048
	OLR6	55.12	30.92	13.94	25.69	0.0000
	OLR5	40.13	49.57	10.29	25.22	0.0000
OCT	ZON9	56.13	23.66	20.20	23.56	0.0000
	ZON6	50.43	26.07	23.48	13.25	0.0041
	OLR7	48.77	29.14	22.08	11.47	0.0094
	OLR6	56.28	27.30	16.41	25.49	0.0000
DIC	ZON9	55.86	26.37	17.75	23.95	0.0000

asociarse en el *lag* -2 con mayos lluviosos, mientras que hay pocos mayos lluviosos asociados a los vientos débiles, lo cual es complementario con lo que muestra el Cuadro 14, mayos secos asociados al viento débil; en este mes tampoco se observa una influencia clara del viento del W.

Cuadro 15. Resumen de las Cuadros de contingencia 3x3 significativas al 0,1% para la clase de lluvia 1 (abundantes) según la clasificación por los terciles (Porcentajes de casos)

Mes	Variable	Clase de Variable			χ^2	Nivel de Significancia
		-1	0	1		
ENE	NI3412A	53,15	21,84	22,47	19,27	0,0002
	NI3411A	48,73	26,89	21,84	12,32	0,0064
	NI3410A	46,42	33,82	17,22	12,9343	0,0048
	QBO12A	43,55	42,33	14,11	16,65	0,0008
	QBO10A	35,58	48,46	15,95	16,08	0,0011
	QBO9A	28,83	55,21	15,95	24,0355	0,0000
	ZON11A	17,17	42,94	39,87	11,88	0,0078
	ZON10A	14,11	46,62	39,26	17,44	0,0006
	OLR10A	17,70	28,64	53,64	20,36	0,0001
	OLR9A	15,10	40,62	44,27	15,15	0,0017
	SOI11A	15,75	49,15	32,56	16,80	0,0008
	SOI9A	17,43	30,67	49,36	15,50	0,0014
	FEB	NI31	49,12	27,02	23,85	11,37
NI341		50,07	26,06	23,85	12,69	0,0053
OLR1		30,87	15,21	53,91	22,73	0,0000
SOI11A		17,74	50,87	28,84	17,11	0,0007
MAR	OLR2	50,89	19,53	29,57	15,3895	0,0015
ABR	QBO3	36,65	17,08	46,26	13,26	0,0041
	QBO2	37,54	16,19	46,26	14,36	0,0025
	OLR3	35,56	47,68	16,74	14,5845	0,0022
	OLR2	58,55	22,31	19,13	28,76	0,0000
	OLR1	47,53	15,36	37,10	16,16	0,0010
MAY	ZON3	51,30	20,52	28,17	15,40	0,0015
	OLR2	55,38	23,61	20,99	21,98	0,0001
	OLR1	54,55	13,53	31,90	25,3339	0,0000
JUN	OLR5	29,96	48,78	21,25	11,87	0,0078
	OLR2	57,53	21,71	20,74	26,37	0,0000
	SOI4	51,76	28,84	19,39	16,62	0,0008
DIC	SOI8	16,96	38,10	44,92	12,75	0,0052

La influencia del viento en la baja Estratósfera (QBO50), sólo se manifiesta en enero y abril. En este caso se asocian eneros lluviosos con vientos débiles sin importar su dirección, en los *lags* -3 y -4, y pocos eneros lluviosos asociados con vientos fuertes del W. El efecto del viento débil se invierte en abril, pasando a asociarse pocos abriles lluviosos con el viento débil, y porcentajes similares en las celdas extremas, lo cual indica, como en el caso de la OLR en abril explicado en el Cuadro 14, que la QBO50 en abril también está modulando a otros procesos.

Cuadro 16. Resumen de asociaciones entre número de casos de meses secos y lluviosos según las clases de VM

Mes	Eventos Secos		Eventos Lluviosos	
	Muchos casos	Pocos casos	Muchos casos	Pocos casos
ENE	*	*	NI3 y NI34 -; QBO50 débil; OLR +	ZON200 E; QBO50 W; OLR -; SOI -
FEB	NI3 y NI34 +; ZON200 E; OLR -; SOI -	NI3 y NI34 -; ZON200 W; OLR +; SOI +	OLR +; SOI normal	OLR normal; SOI -
MAR	ZON200 E; QBO50 débil; OLR - (a)	ZON200 W; OLR normal	OLR - (b)	OLR normal
ABR	QBO50 débil; OLR + y - (c)	QBO50 W	QBO50 E y W (d)	QBO50 débil
MAY	ZON200 y QBO50 débiles; SOI normal	QBO50 W; SOI +	ZON200 E; OLR -	ZON200 débil
JUN	ATNOR -	ATNOR +	*	*
JUL	OLR (0/- según el lag)		*	*
AGO	OLR (0/- según el lag)	OLR +	*	*
SEP	ZON200 E; OLR -	ZON200 W; OLR +	*	*
OCT	ZON200 E; OLR -	OLR +	*	*
NOV	*	*	*	*
DIC	ZON200 E	ZON200 W	*	SOI -

(a), (b), (c), (d) : meses en que la VM señalada parece estar modulando a (o siendo modulada por) otros procesos. Elaboración propia

Los resultados generales señalados en el Cuadro 17 se confirman con el análisis de la Diferencia Porcentual de los promedios decadales para cada mes respecto al promedio del período de registro total (1950–1998 al norte del Orinoco y 1969–1998 al sur del Orinoco).

En la década normal 51–60 se tuvieron meses de la temporada lluviosa de normales a húmedos, y marzos muy lluviosos hacia oriente. En la década lluviosa 61–70 no sólo hubo temporadas lluviosas normales a húmedas, sino también fue húmeda entre noviembre y enero, aunque los febreros y marzos fueron muy secos. En la década seca 71–80 el efecto de temporadas secas más lluviosas por el SOI normal sólo se manifestó en marzo, mientras que los otros meses de la temporada seca fueron muy secos, así como en los mayos y los julios de la temporada lluviosa, especialmente hacia el centro y oriente del país, lo que confirma la influencia del Atlántico frío. En la década lluviosa muy variable espacialmente 81–90 efectivamente se tuvieron febreros y abrileros lluviosos, mientras que el efecto del SOI normal no se notó en los eneroes, que fueron secos hacia nor-occidente, ni en los marzos, que fueron secos en oriente y los Llanos occidentales. Durante la década seca muy variable espacialmente 91–98** efectivamente el lapso diciembre–febrero fue extremadamente seco en todo el país, pero los marzos fueron lluviosos; el efecto del SOI negativo en la temporada lluviosa no se notó, ya que mayo y junio fueron también secos, especialmente hacia los extremos oriental y occidental del país, lo que probablemente se deba (en oriente) a que

que señalan un punto de inflexión en las series estadísticas que caracterizan las condiciones climáticas del planeta (el promedio y la variabilidad), a mediados de los años 70 (IPCC, 2000 a).

Los resultados señalan que, si se desarrollan ecuaciones predictivas, puede contarse con una herramienta fundamental para optimizar la toma de decisiones estratégicas sobre manejo de recursos hídricos, especialmente a mediano plazo y para grandes cuencas. Si efectivamente puede pronosticarse con base en el comportamiento de los océanos, aunque sólo sea a nivel de tendencias y no valores precisos, que los próximos 10 años serán en general más secos o más lluviosos que lo normal, las implicaciones en términos de optimización del manejo, inversión en obras, etc., serían altamente beneficiosas para el país. Sería conveniente ampliar este tipo de análisis para el conjunto de las temporadas seca y lluviosa, ya que el pronóstico, incluso a nivel de tendencia, del carácter general de la próxima estación lluviosa tendría también una enorme utilidad práctica para muchos usuarios de la información climática.

Para el sector productivo, por los momentos, la situación no es tan promisorio. En el caso de la agricultura, incluso el concepto de "evento extremo" es muy particular (Puche, 2000); en efecto, un veranito de 10–15 días en la etapa crítica del cultivo puede tener consecuencias desastrosas en el rendimiento final, pero climáticamente hablando puede tratarse de un evento relativamente normal. En este caso, dado que se trata de seres vivos que responden en tiempos muy cortos a situaciones de estrés, para que cualquier tipo de pronóstico sea realmente útil, es imprescindible conocer antes tres aspectos :

- a) el comportamiento de la lluvia con mucho mayor detalle espacio-temporal, incluyendo su distribución en períodos menores que un mes;
- b) los valores umbrales del comportamiento de la lluvia que afectan a los seres vivos y a la organización de las actividades agrícolas;
- c) la situación actual de los diferentes sistemas de producción agrícola.

Desde este punto de vista, las VM atmosféricas, aunque de análisis más complicado, son realmente promisorias, puesto que establecen cambios en los patrones de lluvia en tiempos de un mes, por lo que deben continuar estudiándose, especialmente con relación a la distribución de la lluvia en períodos menores de un mes. Recuérdese que en este trabajo las VM se analizaron al nivel de los valores promedio espacio-temporales (todas las grillas, los 30 días del mes), pero existen los datos de cada grilla y para cada día del mes en el Comprehensive Ocean–Atmosphere Data Set (COADS), lo que permitiría un análisis temporal adecuado a las necesidades agrícolas.

En este orden de ideas, sería también de gran utilidad comenzar el estudio sistemático de la influencia de otros elementos del Sistema Climático, como las Oscilaciones Madden-Julian, sobre la lluvia en el país, ya que se trata de variaciones a nivel intra-estacional, con ciclos de 40-80 días, y cuya influencia parece notarse al nivel de grupos aproximadamente semanales a decadiarios (Dr. Daniel Pavón, Instituto de Estudios Ambientales, IDEAM, Colombia, comunicación personal).

variabilidad; en la temporada seca aumenta la variabilidad a los rangos de muy alta a extrema en todo el país, incluido el muy lluvioso sur. Es probable que esto se deba a que cualquier indicador de variabilidad compara un estimado de valor central de la serie con un estimado de dispersión de la serie, y si el valor central es pequeño (como la lluvia durante la temporada seca), el valor de variabilidad será siempre alto.

- A nivel decadal, la precipitación también muestra variabilidad de los montos anuales de precipitación : la década 1951–1960 fue normal, la 61–70 lluviosa, la 71–80 seca, la 81–90 lluviosa y la década incompleta 91–98** seca, en lo que parece un patrón alternado bastante consistente, aunque en las dos últimas (de los años 80 en adelante) hay además un aumento significativo de la variabilidad espacial. En las tres primeras décadas se observó una alternancia espacial : cuando oriente fue muy lluvioso, occidente fue seco, y viceversa.
- Las décadas normal (51–60) y las décadas lluviosas (61–70 y 81–90) se caracterizaron porque los meses de la temporada lluviosa fueron de normales a lluviosos en buena parte del país, y en la 61–70 incluso parte de la temporada seca fue, en promedio, más lluviosa que lo normal. Las décadas secas (71–80 y 91–98**) se caracterizaron por uno o más meses de la temporada lluviosa relativamente secos en alguna(s) de las regiones del país. Asimismo, en estas décadas, especialmente la 91–98**, la temporada seca fue más seca que lo normal.
- La clasificación de la precipitación en 3 clases (según los valores de los terciles) en “escasa a normal”, “normal” y “normal a excesiva”, no permite, en promedio, diferenciar si alguna de las tres clases se presenta en muchas estaciones simultáneamente o si más bien se producen concentradas espacialmente, por lo que esta clasificación puede presentar problemas de uso en el pronóstico estacional. En contraste, la clasificación en 4 clases (según la desviación estándar) en “muy escasa”, “escasa a normal”, “normal a excesiva” y “excesiva”, diferencia mejor la concentración espacial de los eventos extremos, que en promedio afectan a menos del 15% de las estaciones; la clase “escasa a normal” ocurre en el mayor número de estaciones en todos los meses, y la clase “normal a excesiva” no permitió diferenciar ningún patrón de concentración espacial.
- Del análisis de la precipitación clasificada en 3 y en 4 clases, se puede concluir que los eventos extremos (secos o lluviosos) de gran extensión espacial que afecten a una gran proporción de las estaciones son poco frecuentes. En el caso de los eventos extremos secos generalizados, tienden a producirse entre abril y julio, y luego en noviembre–diciembre, mientras que los eventos extremos lluviosos generalizados han ocurrido en cualquier mes.
- De la comparación entre los gráficos del comportamiento de las Variables Macroclimáticas (VM) a lo largo del tiempo, y los promedios decadales de precipitación, se obtuvo una visión gruesa de la relación entre la lluvia en el país y las VM, que muestra concordancia al nivel decadal. Para las décadas normal (51–60) y lluviosa (61–70), el Atlántico Tropical norte estuvo de normal a caliente, en la década seca 71–80 estuvo preponderantemente frío, y en las décadas 81–90 (lluviosa) y 91–98** (seca) presentó mucha variabilidad. En el Pacífico

a septiembre. Las VM oceánicas y el Campo de Presiones del Pacífico ecuatorial (NI3, NI34 y SOI) presentan correlación con la precipitación de agosto hasta marzo, negativa las primeras y positiva el segundo. El Campo de Viento de la Baja Estratósfera (QBO50) presenta correlación positiva entre febrero y abril, junio, agosto y octubre, cambiando a negativa entre noviembre y enero. El Campo de Viento de la alta Tropósfera (ZON200) presenta correlación positiva entre enero y marzo, cambiando a negativa en abril y mayo, y de nuevo a positiva en agosto y diciembre. La Intensidad de la Convección (OLR) presenta correlación positiva entre agosto y febrero, cambiando a negativa en abril y mayo. Las manchas solares (WOLF) presentan correlación positiva en abril y mayo.

- Dichos análisis también mostraron que muchas de las VM pueden usarse con uno ó más meses de antelación para predecir el comportamiento de la lluvia en los meses siguientes.
- Al analizar mediante tablas de contingencia el tipo de efecto de las VM clasificadas según los terciles, sobre los rangos extremos de precipitación también clasificada según los terciles (lluvias escasas y lluvias excesivas), se pudo concluir que, en general, son los valores extremos de las VM los que aparecen ejerciendo más efecto sobre los valores extremos de la precipitación, aunque en algunos casos se observa un mayor efecto del rango normal de la VM.
- En algunos casos, especialmente con la Intensidad de la Convección y el Campo de Viento de la Baja Estratósfera, se observa que en algunos meses, los rangos extremos de dichas VM ejercen el mismo efecto sobre la precipitación (por ejemplo, se asocia el comportamiento seco de un mes tanto a Convección fuerte como a Convección débil), lo cual no es lógico. Esta situación podría estar indicando que, para tales meses, esas VM funcionan como "moduladores" de otros procesos que son los que realmente originan las lluvias extremas. Podría también estar indicando que dicha VM para ese mes en particular realmente no afecta a la precipitación.
- Sólo para las VM oceánicas puede decirse con un elevado grado de confianza que funcionan coherentemente en "dos vías". En sus respectivas áreas de influencia espacial, el Pacífico caliente provoca temporadas secas muy secas, y si está frío, temporadas secas más lluviosas que lo normal, mientras que el Atlántico Tropical norte caliente provoca temporadas lluviosas más lluviosas que lo normal (especialmente en junio), y si está frío, temporadas lluviosas pobres. Para alguna de las otras VM puede afirmarse lo mismo, pero sólo en uno o dos meses del año. Para la mayor parte de las VM puede afirmarse que producen efecto con uno de sus signos, pero no el efecto opuesto cuando cambian de signo.
- Con relación a las influencias de las VM Campos de Viento, Intensidad de la Convección y Manchas Solares, sus efectos son mucho más complejos, ya que parecen estar funcionando con un solo mes de retardo, lo cual es esperable para las dos primeras, porque la atmósfera responde más rápido que los océanos, debido a su menor inercia. No ha sido posible distinguir un patrón estable de influencia de estas VM sobre la lluvia, no obstante su influencia es muy importante por dos razones :

7. RECOMENDACIONES

La recomendación principal de este trabajo, consiste en que es necesario profundizar el conocimiento de cómo y por qué las interacciones del Sistema Climático se reflejan, a mesoescala, en los diferentes "climas" del país, especialmente en lo que al comportamiento de la precipitación se refiere.

Bajo esa óptica, podría generalizarse diciendo que deben reforzarse los análisis iniciados en este trabajo mediante la incorporación de otras variables, climáticas y no climáticas, así como afinando los niveles temporal y espacial de los estudios. A continuación se señalan algunos tópicos específicos que se consideran útiles tanto para comprender mejor la dinámica climática del país como para mejorar la toma de decisiones estratégicas y, en consecuencia, obtener aplicaciones prácticas mucho más efectivas.

- Analizar tanto las láminas de precipitación como su distribución ("spells") en períodos menores de un mes, dado el vital interés práctico de estos aspectos en agricultura.
- Analizar el comportamiento de los ríos como "resumidores" del comportamiento integrado de las relaciones precipitación–escorrentía, lo cual es de gran importancia para la planificación y el manejo de los recursos hídricos; en este caso se recomienda tomar grandes cuencas (Orinoco, Apure, Caroní, por ejemplo) para minimizar el impacto sobre los datos de escorrentía que provoca la actividad antrópica.
- Analizar el comportamiento de los acuíferos, ya que, además de su propia importancia como recurso hídrico fundamental en muchas regiones del país, controlan el comportamiento de los ríos en temporada seca, y con tiempos de retardo mayores, incluso en la temporada lluviosa.
- Obtener las ecuaciones predictivas del comportamiento de la precipitación al nivel estacional.
- Profundizar los análisis al nivel regional, lo que permitiría ampliar el número de estaciones aunque se disminuya el período de registro, además de considerar los efectos locales, muy especialmente los topográficos.
- Como investigación básica de la dinámica del Sistema Climático a mesoescala, se recomienda iniciar una línea de investigación sobre las relaciones entre el caudal del Orinoco y el comportamiento del Atlántico Tropical norte en el área del Caribe, conocida la influencia que los caudales de los grandes ríos tienen sobre el océano, especialmente en lo que a corrientes termohalinas se refiere. Dado que ya se demostró que la temperatura del Atlántico está influenciando a la lluvia en Venezuela, si se determina que el caudal del Orinoco influencia a la temperatura del Atlántico, se tendría otro indicador, esta vez remoto, para pronosticar a la lluvia con más tiempo de antelación. En este caso se recomienda utilizar no los datos promedio espacio–temporales que se usaron en este trabajo, sino los verdaderos valores de grilla del COADS (Comprehensive Ocean-Atmospheric Data Set).

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J.A. (mimeografiado, s/f). **"Distribución Estacional y Espacial de la Pluviosidad en Venezuela"**. Caracas, Venezuela. 49 p.
- Alvarez Bernal, F. (1983). **"Atlas Climatológico de Venezuela 1951/70"**. Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Imprenta Universitaria, UCV. Caracas, Venezuela. 132 p.
- Barry, R.G., Chorley, R.J. (1985). **"Atmósfera, Tiempo y Clima"**. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 500 p.
- Bonnier, G., Tedin, O. (1966). **"Bio-Estadística"**. Editorial Agribia. Zaragoza, España. 233 p.
- Bradshaw, M., Weaver, R. (1993). **"Physical Geography – An Introduction to Earth Environments"**. Mosby – Year Book Inc. Saint Louis, USA. 330 p.
- Comisión Nacional de Meteorología e Hidrología (CNMeH) – CONICIT (1998). **"El Fenómeno El Niño y su posible influencia sobre el Territorio de Venezuela"**. 21 p.
- Cuadrat, J.M., Pita, M.F. (2000). **"Climatología"**. Ediciones Cátedra (Grupo Anaya S.A.). Madrid, España. 496 p.
- Enfield, D., Mayer, D. (1997). **"Tropical Atlantic Sea Surface Temperature variability and its relation to El Niño–Southern Oscillation"** en : Journal of Geophysical Research, Vol. 102, N° C1, p. 929-945.
- García, L.F., Guerra, A. (1993). **"Manual de Pronósticos Meteorológicos"**. Departamento de Alerta contra Inundaciones y Sequías, Dirección de Hidrología y Meteorología, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela. 76 p.
- García, L.F., Guerra, A. (1999). **"Identificación de Patrones Sinópticos Meteorológicos en Venezuela – Resumen 1988-1997"**. Asesora Meteo C.A., Proyecto Pronósticos y Proyectos Hidrometeorológicos D.F., preparado para la Dirección de Hidrología y Meteorología, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela. 89 p. más Anexos.
- Gibbs, W.J; Maher, J.V.; Coughlan, M.J. (1978). **"Patterns of shorter-term change and variability"** en : Climatic Change and Variability : a southern perspective. (135-199). Editores : A.B. Pittock, L.A. Frakes, D. Jenness, J.A. Peterson and J.W. Zillman. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra. 455 p.
- Goldbrunner, A. (1984). **"Atlas Climatológico de Venezuela 1951/70"**. Servicio de Meteorología, Fuerza Aérea. Maracay, Venezuela. 68 p.
- González, M., Córdova, J.R. (1992). **"Análisis Estadístico de Precipitación Máxima Probable en Venezuela"**, en : Ponencias del IV Encuentro Nacional de Clima, Agua y Tierra, IV Jornadas Nacionales de Hidrología, Meteorología y Climatología. 2 (231-247). Caracas, Venezuela. 410 p.
- Hastenrath, S. (1986). **"On Climate Prediction in the Tropics"**, en : Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 67, N° 6, p. 696-702.

- Martelo, M.T. (2000, b). Proyecto CONICIT N° 96001922 **“Reforzamiento de los Sistemas de Información Hidroclimática Digitalizada de Venezuela”**. Dirección de Hidrología y Meteorología, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela. (Archivos Digitalizados de : Mapas mensuales y anual de Precipitación, Mapas anuales de Temperatura Máxima Media y Temperatura Mínima Media, 8 Mapas de Clasificación Agroclimática para 11 Estados al Norte del Orinoco, Mapa Hidrogeológico, 2000 Registros Geoelectrónicos. Fuente de los mapas y Registros Geoelectrónicos : 21 estudios del Departamento de Agrometeorología de diversos autores, estudios del Departamento de Aguas Subterráneas de diversos autores).
- Mead, R., Curnow, R.N. (1983). **“Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology”**. Chapman and Hall Ltd., Londres, Inglaterra. 335 p.
- Medina, M. (1994). **“Iniciación a la Meteorología”**. Editorial Paraninfo, Madrid, España. 260 p.
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (s/f). **“El Clima de Venezuela”**. Mimeografiado. Departamento de Agrometeorología, Dirección de Hidrología y Meteorología. Caracas, Venezuela. 7 p.
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. (2001). **“Estrategia Nacional sobre Diversidad Biológica y su Plan de Acción”**. Oficina Nacional de Diversidad Biológica. Caracas, Venezuela, 135 p.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (1999). **“Frequently Asked Questions. Tropical Intraseasonal Activity”**. Climate Prediction Center, tomado en Internet de la dirección : http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/intraseasonal/intraseasonal_faq.html.
- National Oceanic and Atmospheric Administration – hoja Web : <http://www.noaa.gov>
- Organización Meteorológica Mundial. (1990). **“Guía de Prácticas Climatológicas”**. OMM-N° 100. Gineve, Suiza. 274 p.
- Organización Meteorológica Mundial. (2000). **“Consejo Ejecutivo. Quincuagésima Segunda Reunión. Informe Final Abreviado y Resoluciones”**. OMM-N° 915. Gineve, Suiza. 91 p.
- Petterssen, S. (1976). **“Introducción a la Meteorología”**. Espasa-Calpe, S.A. Madrid, España. 469 p.
- Poveda, G. (2000 a). **“Mecanismos Físicos Asociados a la Variabilidad Interanual del Ciclo Hidrológico en Colombia”**, mimeografiado para : Taller sobre el Papel de la Biósfera en el Sistema Climático, el caso del Trópico Suramericano, organizado por la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. 6 p.
- Poveda, G., Mesa, O.J. (2000 b). **“On the existence of Lloró (the Rainiest Locality on Earth) : Enhanced Ocean–Land–Atmosphere Interactions by a Low–Level Jet”** en : Geophysical Research Letters, Vol. 27, N° 11, págs 1675-1678.
- Puche, M.T. (2000). **“¿Qué significa Evento Extremo en Agricultura?”** en : Reunión de Expertos de las Asociaciones Regionales III y IV sobre Fenómenos Adversos. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. 254 p.

