

INVAMAR



Libertad y Orden

INGEOMINAS



EVOLUCIÓN GEOHISTÓRICA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA Y SUS CUENCAS



INFORME FINAL

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA Y SU EFECTO REGULADOR DEL CLIMA REGIONAL

**Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
José Benito Vives De Andrés**

Vinculado al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA Y SU EFECTO REGULADOR DEL CLIMA REGIONAL

INFORME FINAL

CUERPO DIRECTIVO

Director

Francisco A. Arias Isaza

Subdirector

Coordinador de investigaciones

Jesús Antonio Garay Tinoco

Coordinador (e)

Programa Biodiversidad y Ecosistemas
Marinos (BEM)

Gabriel Navas

Coordinador

Programa Valoración y Aprovechamiento de
Recursos Marinos Vivos (VAR)

Mario Rueda Hernández

Coordinadora

Programa Calidad Ambiental Marina (CAM)

Luisa Fernanda Espinosa

Coordinador del Proyecto

Georgina Guzmán Ospitia

Investigador

Jacobo Blanco Racedo

1.1.1. Diciembre de 2008 - Santa Marta - Colombia



Libertad y Orden

INGEOMINAS
Instituto Colombiano
de Geología y Minería



INVEMAR - Cerro Punta de Betín, Santa Marta - Colombia, Apartado Aéreo 1016 - <http://www.invemar.org.co>



Libertad y Orden

Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas
Diagonal 53 No. 34 – 53
Bogotá D.C.
Teléfono: (+57) (+1) 2200200 / 2200100 / 2221811
Fax: (+57) (+1) 2200092

www.ingegominas.gov.co



Instituto Colombiano del Petróleo – Ecopetrol ICP
Autopista Piedecuesta Km. 7.
Bucaramanga (Santander)
Teléfono: (+57) (+7) 6445420
Fax: (+57) (+7) 6445444

www.ecopetrol.com.co



COLOMBIA
50% MAR

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” – Invemar
Vinculado al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Cerro de Punta Betín
Santa Marta DTCH.
PBX: (+57) (+5) 4380808
Fax: (+57) (+5) 4300801

www.invemar.org.co

Edición:

David Fernando Morales Giraldo
Programa de Geociencias Marinas y Costeras – GEO

Diseño de Portada:

Germán Gómez

Foto de portada:

Externa: Unidad Batolito de Atánquez en el río Badillo, departamento del Cesar (Geosearch)
Interna: Bahía de Santa Marta (Magdalena) desde los cerros Ziruma. (Programa GEO – INVEMAR)

Foto de contraportada:

Arriba: Río Frío, 200 m arriba en el sector de la troncal del Caribe (Geosearch)
Izquierda: Sierra Nevada de Santa Marta (Foto Danilo Villafañe)
Centro Izquierda: Unidad Esquisto de Gaira cortada por diques pegmatíticos, vía alterna al puerto de Santa Marta (Geosearch)
Centro Derecha: Quebrada Valencia, Magdalena (Programa GEO – INVEMAR)
Derecha: Plataforma de abrasión al occidente de la ensenada Playa Brava PNNT (Programa GEO – INVEMAR)

Derechos reservados según la ley, los textos pueden ser reproducidos total o parcialmente citando la fuente.

Realizado como contrato de prestación de servicios No. 01806 en el marco del Convenio 006-05 INGEOMINAS – ECOPETROL ICP – INVEMAR.

Cítese como:

INGEOMINAS, ECOPETROL ICP, INVEMAR, 2008. Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. Caracterización climática de la SNSM y su efecto regulador en el clima regional. 64 p, anexos digitales.

Palabras clave:

Caracterización climática, Sierra Nevada de Santa Marta, Evolución geohistórica, clima regional.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	I
INDICE DE FIGURAS	III
INDICE DE TABLAS	V
INDICE DE ANEXOS	I
1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA	4
2.1. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS CON INFORMACIÓN SATELITAL DEL VIENTO EN EL CARIBE COLOMBIANO.	4
2.2. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS CON DATOS DE ESTACIONES EN LA SNSM	6
2.3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA SNSM Y SU EFECTO REGULADOR DEL CLIMA REGIONAL 6	
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	8
3.1. CLIMATOLOGÍA DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO PARA EL MAR CARIBE COLOMBIANO (8° A 16°N – 69° A 84°W).	8
3.2. CLIMATOLOGÍA DE LA SNSM, CON BASE EN LA INFORMACIÓN ADQUIRIDA DE ESTACIONES, PLUVIOMÉTRICAS, LIMNIMÉTRICAS Y ANEMOMÉTRICAS DE IDEAM.	12
3.2.1. Estaciones Anemométricas	12
3.2.2. Estaciones Pluviométricas.....	13
3.2.3. Estaciones Limnimétricas	14
3.3. CIRCULACIÓN DEL VIENTO ALREDEDOR DE LA SNSM.....	16
3.4. EL RELIEVE TERRESTRE Y EL CLIMA LOCAL.....	20
3.5. PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES ANUALES EN LA SNSM.....	24
3.6. RÍOS PRINCIPALES EN LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA.	25
3.6.1. Los Fallamientos de la SNSM y su Orientación	25
3.6.2. Los Núcleos Fluvioógenos	26
3.6.2.1 Núcleo N1. – Minca.	28
3.6.2.2 Núcleo N2. – San Lorenzo.	28
3.6.2.1. Núcleo N3 – Sevilla.	30
3.6.2.2. Núcleo N4. – Aracataca.....	31

II	Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta – Caracterización Climática	
3.6.2.3.	Núcleo N5. – Ariguaní.....	31
3.6.2.4.	Núcleo N6. – Guatapurí.	33
3.6.2.5.	Núcleo N7. – Ranchería.	34
3.6.2.6.	Núcleo N8. – Cañas.	35
3.7.	Implicaciones climáticas asociadas a condiciones atmosféricas en el Caribe	36
3.8.	RELACIONES INFERIDAS ENTRE EL CLIMA Y LA GEOMORFOLOGÍA DE LA SNSM.....	39
3.8.1.	La Distribución mensual y diaria de nubosidad y lluvias	39
3.8.2.	Las condiciones geomorfológicas favorables para lluvias en la Sierra Nevada	39
3.8.3.	El viento Föhn, Perijá, y el efecto sombra de lluvias en el valle Cesar-Ranchería.	40
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
5.	BIBLIOGRAFÍA	50

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Ubicación del área de estudio.....	4
Figura 2-2. Malla de 1° X 1° que describe el conjunto de la zona de estudio.	5
Figura 3-1. Variación de la dirección (izquierda) y de la velocidad del viento (derecha) entre 05/08/1991 y 18/09/2006 para el punto ejemplarizado (11.5°N / 75.5°W).....	9
Figura 3-2. Componente zonal de la velocidad del viento en cm.s^{-1} para el mes de enero. Datos de los satélites ERS-1, ERS-2 y QUIKSCAT; resolución 1°x1°.....	10
Figura 3-3. Componente meridiano de la velocidad del viento en cm.s^{-1} para el mes de enero. Datos de los satélites ERS-1, ERS-2 et QUIKSCAT ; resolución 1°x1°.....	11
Figura 3-4. Velocidad (cm.s^{-1}) y dirección del viento (°) para el mes de enero. Datos de los satélites ERS-1, ERS-2 y QUICKSCAT; resolución 1° x 1°.....	11
Figura 3-5. Ubicación de estaciones anemométricas en la SNSM y zonas aledañas.....	12
Figura 3-6. Ubicación de estaciones pluviométricas en la SNSM y zonas aledañas.....	13
Figura 3-7. Ubicación de estaciones limnimétricas en la SNSM y zonas aledañas.....	15
Figura 3-8. Velocidad y dirección del viento resultante (W), y de los componentes zonal y meridiano en 3 localidades, (a) P- 05, (b) P- 06 y (c) P- 08, con influencia en el sector costero de la Sierra Nevada de Santa Marta. .	18
Figura 3-9. Variación anual del ángulo de la dirección del viento resultante en los tres puntos selectos (P-05, P-06 y P-07).	19
Figura 3-10. Circulación del viento alrededor de la Sierra Nevada y su dependencia de la morfología del macizo.	23
Figura 3-11. La geomorfología general de la Sierra Nevada y su asociación con la circulación del viento, núcleos de nacimiento y cuencas de los principales ríos del macizo.	27
Figura 3-12. Variación anual media de los caudales de los ríos originarios del Núcleo 4, Aracataca y Fundación. El pico de octubre para el Aracataca, coincide con el mayor ángulo de dirección del viento (°) en P-05. En el Fundación el máximo relativo ocurre en noviembre.	32
Figura 3-13. Variación anual del caudal del río Ariguani, las precipitaciones (mm) cerca del Núcleo 5 y del viento (°) en el punto P-05.	33
Figura 3-14. Variación anual de los caudales de los ríos Ranchería, Tapias y Badillo, con nacimiento en el núcleo 7 y la dirección del viento en el punto P-06.....	35
Figura 3-15. Variación anual del caudal del río Cañas en el núcleo 8 y la dirección del viento en el punto P-06.....	35
Figura 3-16. a) El paso del huracán Dean con aumento de nubosidad y lluvias por la humedad procedente del sur, inicia las perturbaciones atmosféricas en la SNSM desde antes de llegar frente a ella. El paso del huracán Dean frente a la SNSM (b) y luego de haber pasado (c). Nótese la persistencia de las perturbaciones atmosféricas favorecedoras de lluvias en el macizo.....	38
Figura 3-17. Imagen de satélite (Modis_wind_composite) de la distribución de la nubosidad sobre los núcleos de nacimiento de los principales ríos de la SNSM en 28-08-2007. Obsérvese la relativa ausencia de nubes sobre el valle Cesar-Ranchería y en el ángulo nororiental del macizo, causada por el efecto de sombra de lluvias con la retención de humedad del lado venezolano de la Serranía de Perijá. (Fuente: Next-Sat Project, http://www.nrlmry.navy.mil). Viento del E con velocidad entre 8 y 12 m s-1.....	39
Figura 3-18. Esquema del ascenso del aire húmedo desde el mar hacia la cumbre del sistema montañoso de la Sierra Nevada. Temperaturas del aire y de punto de rocío (PR) en °C.	40
Figura 3-19. El efecto sombra de lluvias esquematizado.	41
Figura 3-20. Representación de la circulación del viento del este sobre la Serranía de Perijá, que actúa como barrera causa el efecto 'sombra de lluvias'. El viento 'Föhn' que desciende, reseca y calienta el terreno al pasar	

sobre el valle Cesar-Ranchería. Nótese la retención de nubosidad del lado venezolano de Perijá. En trazos, el viento NE también derivado del este, que fluye a lo largo del valle. Imagen de Google Earth.44

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Semanas de medición efectivas compiladas en la base de datos	5
Tabla 3-1. Matriz de correlación de la dirección del viento resultante (W), su velocidad (Dir) y los componentes zonal (U) y meridiano (V) en tres puntos selectos frente a la costa de la Sierra Nevada de Santa Marta (P-05, P-06 y P-07). (Datos de Quikscat)	17
Tabla 3-2. Matriz de correlación entre la dirección del viento, precipitación en estaciones (cursiva) y caudales medios de los ríos del núcleo 2.	29
Tabla 3-3. Matriz de correlación entre la variación anual de los caudales de los ríos del Núcleo 3, entre ellos, con la dirección media mensual del viento en el área P-05 y con la precipitación mensual promedio en la estación Tucurinca a 450 m de altitud. Todos los valores son muy significativos ($p < 0.01$).	30
Tabla 3-4 Correlación entre los caudales de los ríos que nacen en el núcleo 3 y con el patrón de dirección del viento en el punto P-05	31
Tabla 3-5. Matriz de correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en el núcleo 5 entre caudal del Ariguani, precipitaciones en Pueblo Bello y dirección del viento en el punto P-05.	33
Tabla 3-6. Matriz de correlación de caudales de los ríos, precipitación (PPTN) y dirección del viento en el punto P-06, asociados con el núcleo N6. La mayoría son estadísticamente muy significativas ($p < 0.01$)	34
Tabla 3-7. Matriz de correlaciones en el Núcleo 7, entre los caudales medios de los ríos Ranchería, Tapias y Badillo y con la dirección del viento en P-06.....	36
Tabla 3-8. Humedad referida al aire saturado de humedad SWV (F) y al aire seco (f) o TMV, con la temperatura (T), según los modelos exponenciales calculados.....	42

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Animación vientos SNSM

Anexo 2. Estaciones Hidrológicas y Climatológicas

Anexo 3. Patrones de precipitación en la SNSM

1. INTRODUCCIÓN

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es el sistema montañoso costero más alto del mundo (5900 m) y por su localización tropical presenta características muy particulares. El análisis de las relaciones entre la geomorfología y el clima actual de la Sierra Nevada es tratado aquí a la luz del conocimiento existente sobre ambos aspectos, como punto de partida para hacer inferencias acerca de las condiciones en el pasado geológico. Sin embargo, el enfoque inicial debe ser amplio, de modo que abarque todo el macizo, como referencia básica, antes que dirigirse a localidades definidas con sus propias características.

Un factor directamente asociado con el clima de un sistema montañoso como este es la producción de agua. Esta producción origina y alimenta a los principales ríos de la Sierra Nevada. Usualmente los estudios limnológicos se refieren a las vertientes y a las cuencas de tales corrientes, pero en este análisis se tendrá en cuenta principalmente la localización de los sitios de origen de los ríos de la Sierra, las llamadas estrellas fluviales.

Se parte de que el proceso de formación de agua en el macizo, depende de fenómenos esencialmente físicos, donde la orientación y geomorfología de la Sierra, juegan un papel importante. En realidad se conoce que el agua no se genera en la Sierra misma, sino en el mar o en el interior del continente y es transportada por el viento hacia el macizo. Para todo este proceso de formación de agua se requiere energía y entonces hay que definir las fuentes energéticas relacionadas, autóctonas o intrínsecas, y alóctonas o extrínsecas.

En el primer grupo, está la energía potencial de la localización geográfica misma del macizo, su elevación y su quebrada topografía (geomorfología), incluyendo la presencia de valles y cañones que sirven de conducto a fluidos, como el agua y el aire.

En el segundo grupo, está la energía solar, muy abundante en el trópico, aunque su ángulo de incidencia también varíe durante el año. Se necesita para la evaporación del agua del mar, así como para calentar el continente, afectando la distribución de la presión atmosférica. Adicionalmente está la energía eólica, principalmente de los vientos alisios, que transportan la humedad del mar hacia la montaña.

En ausencia de los vientos alisios, y por encontrarse en el trópico, hay que tener en cuenta el ciclo diario de calentamiento diferencial de la superficie del mar y del macizo, que provoca el conocido ritmo de viento hacia y desde el mar. A mayor temperatura, el aire es capaz de disolver y transportar más cantidad de humedad. La prevalencia de los vientos alisios garantiza el suministro de humedad del mar, que luego se condensará en las alturas de la Sierra al disminuir la temperatura por efecto de la altitud.

En este análisis enfocaremos el análisis en la influencia de los vientos alisios sobre el clima del macizo, como también el muy importante aporte continental de humedad, acarreada por vientos convectivos del SW, que en la región llegan a causar los llamados 'vendavales', por similitud con los que ocurren a fines de otoño en el Mediterráneo frente a Gibraltar, también con dirección SW y asociados con lluvias y tormentas. (www.bbc.co.uk/weather/features/understanding/wind_world.shtml)

Los vendavales locales son debidos al descenso súbito de masas de aire frías ('downdrafts') en áreas localizadas en el piedemonte al W de la Sierra Nevada de Santa Marta (López y Howell, 1961).

Los vientos alisios que son vientos entablados, con velocidades y dirección definidas por las diferencias de presión atmosférica entre la celda de alta presión subtropical del Atlántico Norte (Azores – Bermuda) y las bajas en nuestras latitudes. La altitud de los alisios es cercana a los 2000 m, de modo que para llevar el aire húmedo a altitudes mayores que esa, se necesita energía que permita realizar ese trabajo.

También es importante en este transporte ascensional de las masas de aire húmedo, el efecto de 'plano inclinado' de las laderas de la Sierra, acentuado por la presencia de valles ascendentes que las conducen hacia mayor altura. El análisis de la presencia de núcleos nubosos muestra una correspondencia con los anticlinales de dichos valles, de modo que se forman precisamente encima en las crestas hasta donde logran ascender las masas de aire húmedo que allí condensan. En CD Anexo, El Anexo 1 muestra una animación idealizada para ver con Windows Media, de la circulación del viento alrededor de la Sierra.

De todos modos, siendo los vientos alisios el medio principal de transporte de humedad del mar Caribe hacia la Sierra, merecen un análisis adecuado, que ante la carencia de registros multianuales continuos en estaciones anemométricas situadas sobre el macizo, se fundamenta en la información de COADS y de la dispersometría de satélites, (Quikscat, ERS1 y ERS2) teniendo en cuenta sus componentes zonal y meridiano y cómo varía su influencia (velocidad y dirección) durante el ciclo anual.

Los vientos zonales soplan generalmente de este a oeste a lo largo de los paralelos y los vientos meridianos soplan de norte a sur, sobre los meridianos geográficos. Por convención, en ambos casos el signo de los datos es negativo y se toman como positivos si la dirección es opuesta a la mencionada.

A su vez, la respuesta a dichas variaciones se analiza aquí considerando su relación con la variabilidad anual de las precipitaciones (en estaciones pluviométricas) y finalmente con los caudales de los ríos principales de la Sierra, registrados en estaciones limnimétricas existentes, en el marco de los rasgos más característicos de la geomorfología general del macizo.

Los factores que caracterizan la particularidad climática de cada una de las tres caras que conforman el macizo montañoso de la SNSM son principalmente, su posición latitudinal al extremo norte de Sudamérica, su aguda variación de altura, su posición frente al mar y a los vientos Alisios del Nordeste (para los cuales representa un obstáculo), frente a la Serranía del Perijá y a las llanuras y cuerpos de agua del bajo Magdalena.

De los factores arriba mencionados, son exógenos o sea de un origen distinto a su posición geográfica, los vientos alisios, que juegan un papel muy importante en la caracterización climática por su constante accionar en la región. También influyen los sistemas ciclo-genéticos, causantes de depresiones, tormentas y huracanes en el Caribe, asociados con las ondas ecuatoriales.

En el estudio de la "Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta" se ha considerado necesario incluir la influencia del clima en los procesos evolutivos que han tenido lugar para la constitución del macizo. Para poder determinar las implicaciones del clima en el pasado histórico, es necesario conocer cómo se dan estos procesos en el tiempo presente. Dado que no existen antecedentes confiables del clima de la SNSM y teniendo en cuenta que el macizo es afectado directamente por un importante factor climático, como son los vientos alisios

que chocan contra la Sierra, su principal obstáculo en la circulación que tiene lugar en la cuenca del Caribe, se ha analizado tanto la dirección, como la intensidad de estos vientos sobre el mar adyacente a la SNSM, utilizando para ello la información provista por dos fuentes principales: información de satélites (dispersometría) y la resultante de mediciones históricas de boyas y de buques que transitan la región (Proyecto COADS).

Teniendo en cuenta la complejidad intrínseca de la variabilidad anual e interanual de los factores exógenos arriba mencionados, así como la labor necesaria de acopio, selección y análisis de la relativamente escasa información meteorológica local y los tiempos de disponibilidad de los datos de sensores remotos (hasta 18/09/2006) y de estaciones localizadas en la SNSM, este informe constituye una primera etapa de la caracterización climática del macizo y su efecto regulador en la región.

El análisis se fundamenta en una secuencia lógica de eventos, como son la llegada del viento húmedo del mar a la Sierra y sus efectos sobre el régimen de precipitaciones en el macizo y sobre las cuencas de sus ríos principales, reflejados en sus caudales.

La altitud diferencial en la Sierra, puede determinar efectos climáticos al afectar las presiones y las precipitaciones, la orografía local determina en gran medida la forma como el viento y el vapor de agua circulan por el macizo, definiendo áreas de mayor o menor precipitación y de evaporación, que en últimas condicionan la presencia de una alta biodiversidad vegetal y animal.

2. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta que en las regiones tropicales el clima es descrito por el régimen de vientos y el de lluvias (Snow, 1976), inicialmente el estudio se dirige a los factores micro y meso escalares más evidentes: el régimen de vientos alisios y el de las precipitaciones anuales, así como su manifestación en la variación anual de los caudales de ríos importantes de la SNSM, de los que se cuenta con información histórica suficiente (décadas).

Por sus particularidades temáticas y tecnológicas se utilizaron aproximaciones discriminadas para el tratamiento y análisis de la información.

2.1. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS CON INFORMACIÓN SATELITAL DEL VIENTO EN EL CARIBE COLOMBIANO.

La compilación de información y del procesamiento de los datos de dispersometría satelital fue encargada al Laboratorio de Geografía Física UMS del CNRS de Francia, con el Dr. Yves-François Thomas (INGEOMINAS, ECOPETROL-ICP, INVEMAR, 2008).

Los satélites de observación oceánica han estado ya en órbita suficiente tiempo y los algoritmos para el tratamiento de los datos son razonablemente robustos para permitir hoy en día el análisis cronológico de la velocidad y la dirección del viento (satélites ERS-1, ERS-2, ADEOS y QUICKSCAT).

Así se ha logrado caracterizar la velocidad y dirección del viento en el sector del Atlántico noroeste tropical en la jurisdicción colombiana, cubriendo una zona geográfica del Caribe dentro de un cuadrilátero delimitado por los paralelos 7°N y 19°N, y los meridianos 69°W a 84°W. (Figura 2-1).

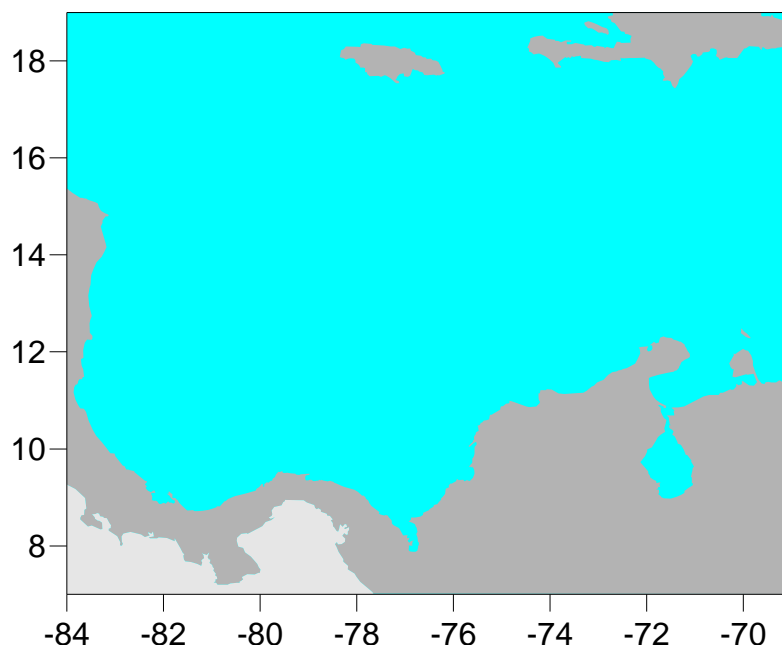


Figura 2-1. Ubicación del área de estudio.

Los archivos de resolución $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ provienen del procesamiento de los datos de los dispersómetros montados en los satélites ERS-1, ERS-2 y NSCAT. Los archivos con resolución $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ provienen del dispersómetro a bordo del satélite QUICKSCAT y que son promediados para una resolución de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

Los archivos de ERS-1 utilizados abarcan de 08/05/1991 hasta 18/03/1996. Los archivos de ERS-2 cubren desde 25/03/1996 hasta 19/07/1999 y finalmente, los archivos QUICKSCAT para el período entre 26/07/1999 y 18/09/2006 (fecha de realización del estudio). Se dispuso de una base homogénea de 1560 archivos de 780 semanas de mediciones repartidas en el tiempo (2-1).

Tabla 2-1 Semanas de medición efectivas compiladas en la base de datos

Mes	Efectivas	Mes	Efectivas	Mes	Efectivas
Enero	66	Mayo	68	Septiembre	68
Febrero	56	Junio	64	Octubre	65
Marzo	66	Julio	65	Noviembre	65
Abril	61	Agosto	71	Diciembre	65

Los archivos fueron procesados mes por mes mediante el programa WD_MOYVAR que suministra para cada mes un conjunto de 3 archivos: media del componente zonal, media del componente meridiano, y media del vector del viento. Cada archivo está compuesto por un conjunto de 360×160 valores. La Figura 2-2 representa la malla de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ que describe el conjunto de la zona de estudio.

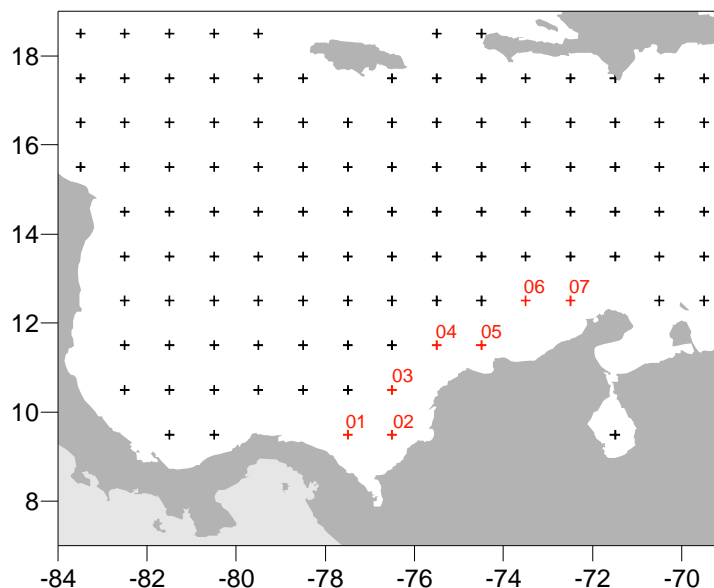


Figura 2-2. Malla de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ que describe el conjunto de la zona de estudio.

2.2. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS CON DATOS DE ESTACIONES EN LA SNSM

La información de las corrientes fue remitida por el IDEAM el 18 de octubre/06 en formato de texto DOS, fue convertida a hoja electrónica de Excel para poder procesar los datos. De las estaciones y para cada una de las variables, precipitación o vientos, se tomó en cuenta el mayor número de series de tiempo anuales con datos mensuales completos. Así fueron utilizados para obtener promedios mensuales de velocidad del viento en cada estación, a partir de valores máximos y mínimos. La dirección del viento se transformó al sistema de 360 grados, para poder representarla conjuntamente (en barras) con la velocidad (líneas) en un mismo gráfico compuesto de Excel y facilitar el análisis de tendencias. Los datos promedio de precipitación por estación en cada mes de las series multianuales completas fueron utilizados para el análisis gráfico. Los cálculos de promedios mensuales no incluyeron celdas de valores vacías. El valor anual de precipitación acumulado corresponde a la sumatoria de los valores mensuales medios en cada serie multianual.

Los datos utilizados de las estaciones limnimétricas fueron los promedios mensuales de series anuales completas de los ríos principales que se originan en el macizo. Las estaciones se ordenaron por departamento y por localización respecto a la Sierra. Los valores fueron graficados de modo de facilitar su análisis temporal de tendencias anuales, en busca de patrones representativos de las distribuciones.

2.3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA SNSM Y SU EFECTO REGULADOR DEL CLIMA REGIONAL

Teniendo en cuenta el propósito de analizar el comportamiento y la influencia del viento que llega a la Sierra desde el mar Caribe, se seleccionó la información sobre vientos de los sitios definidos como P-05 (11° 30' N / 74° 30' W), al NW de Santa Marta; P-06 (12° 30' N / 73° 30' W), frente a la costa del departamento del Magdalena y P-07 (12° 30' N / 72° 30' W), frente a la costa norte de la Guajira. Los datos del Quikscat permiten una mayor resolución de grilla: 0.5 x 0.5° y abarcan desde junio de 1999 hasta agosto de 2006. La frecuencia de registro fue de cuatro a cinco días por mes, estos valores se promediaron para obtener velocidades medias mensuales y dirección promedio mensual del viento en la serie multianual.

El análisis de las variables velocidad del viento zonal, velocidad del viento meridiano, velocidad del viento resultante y dirección del viento, fueron graficados para cada punto seleccionado. Se realizó un análisis de correlación de los promedios de las variables para determinar asociaciones entre patrones anuales de variación. Los meses de mayor variabilidad en velocidad y en dirección del viento se determinaron mediante el cálculo del error típico de la media en cada caso. Para calcular la varianza del ángulo de dirección del viento explicada por el tránsito latitudinal de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) se utilizó el coeficiente de determinación (r^2) con estimativos de la localización latitudinal mensual media de la ZCIT, producida por diversas fuentes (Forsbergh, 1969; Portig, 1976; CPPS, 2000-2006) y los promedios de dirección en una serie multianual. Sin embargo, la falta de estaciones anemométricas de registro continuo a diferentes alturas en la Sierra Nevada, no permitió un análisis de datos comparables con los de dispersometría satelital.

Inicialmente se separaron los datos promedio mensual de 47 estaciones pluviométricas, según su tendencia anual. En su mayoría las estaciones situadas por debajo de los 100 m de altitud

presentan una distribución bimodal en la precipitación anual, con máximo para mayo, mínimo en julio y otro pico en octubre.

Lamentablemente, estas estaciones pluviométricas no están localizadas en las cuencas altas de los ríos principales, sino a altitudes mucho menores, por cuestiones de acceso. Sin embargo, pueden dar una idea de la temporalidad de las precipitaciones en sitios a mayor altitud, como las estrellas fluviales por encima de los 2000 m. Se analizaron los patrones de distribución de lluvias anuales en 47 estaciones pluviométricas en y alrededor de la SNSM.

Se analizó la información limnimétrica de 24 ríos de la SNSM, con mediciones de IDEAM en estaciones situadas invariablemente en la cuenca baja de los mismos a menos de 100 m de altitud. Las series de datos multianuales disponibles son heterogéneas con número de años de registro muy variables. Sin embargo, en cada caso se calculó el caudal promedio para cada mes para definir un patrón de variación anual. Estos valores fueron a su vez correlacionados con sus correspondientes de precipitación y ángulo de dirección del viento en cada uno de los núcleos hidrográficos determinados.

La variación anual de presión atmosférica en el Caribe colombiano se analizó utilizando información colectada por COADS (INGEOMINAS, ECOPETROL-ICP, INVEMAR, 2008). Las presiones atmosféricas en Santa Marta fueron tomadas del sitio web del Weather Channel (weather.com) lo mismo que las de Ponta Delgada (Azores) para hacer comparaciones de variabilidad anual, con la celda de alta presión del Atlántico norte y estimar su correlación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CLIMATOLOGÍA DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO PARA EL MAR CARIBE COLOMBIANO (8° A 16°N – 69° A 84°W).

Evidentemente son muchas las aplicaciones locales que se pueden lograr a partir de una base de datos regional considerando: la cobertura geográfica local y la segmentación temporal. La información de dispersometría satelital incluye una serie de archivos en CD-ROM, que pueden utilizarse con la ayuda de programas adecuados para extraer información cronológica, compuesta de los datos siguientes: año, mes, día, velocidad zonal (cm.s-1), velocidad meridiana (cm.s-1), velocidad resultante (cm.s-1) y dirección del viento (°) para el período comprendido entre 05/08/1991 hasta 18/09/2006 (última semana de datos procesados en el marco de este estudio).

A modo de ejemplo se muestran los resultados gráficos (Figura 3-1) de la variación de la velocidad y dirección del viento en un ciclo de 15 años desde el 5 de agosto de 1991 hasta el 18 de septiembre de 2006, para un punto correspondiente al litoral caribe colombiano en las coordenadas 11.5°N de latitud y 75.5°W de longitud. A partir de 1995 hasta el presente, existe una mayor variabilidad en la dirección del viento que en los años anteriores (1991-1994). La frecuencia de direcciones mayores de 300° (NW) se ha incrementado, como también la dirección SE. Lo anterior implica que el viento que generalmente llamamos del NE, no siempre lo es y por tanto sus efectos pueden variar de un año al siguiente o por épocas o períodos de varios años.

La velocidad del viento alisio ha tenido también variaciones en series multianuales, aumentando (12 m.s^{-1}) a partir de 2000, aunque también en estos años (2000-2006) ha alcanzado con mayor frecuencia velocidades menores que las de la década de los 90 (Figura 3-1). Por tratarse de un factor tan importante en la climatología de la Sierra Nevada de Santa Marta, el significado de estas variaciones merece mayor atención.

A partir de los datos de los satélites, promediados por mes para los diferentes años del estudio y georeferenciados para nuestra región Caribe, se obtuvieron las siguientes representaciones gráficas, en este caso ejemplarizadas para el mes de enero. Es evidente que en todo este sector del Caribe occidental, la mayor velocidad del viento zonal ($800\text{-}1000 \text{ cm.s}^{-1}$) sucede en el mar frente y sobre el área de la Sierra (Figura 3-2). Este núcleo de mayores velocidades del viento (E-W) se desplaza durante el año hacia el frente norte de la Guajira. Indudablemente, estas circunstancias juegan un papel decisivo en la regulación del clima en la Sierra y sus alrededores.

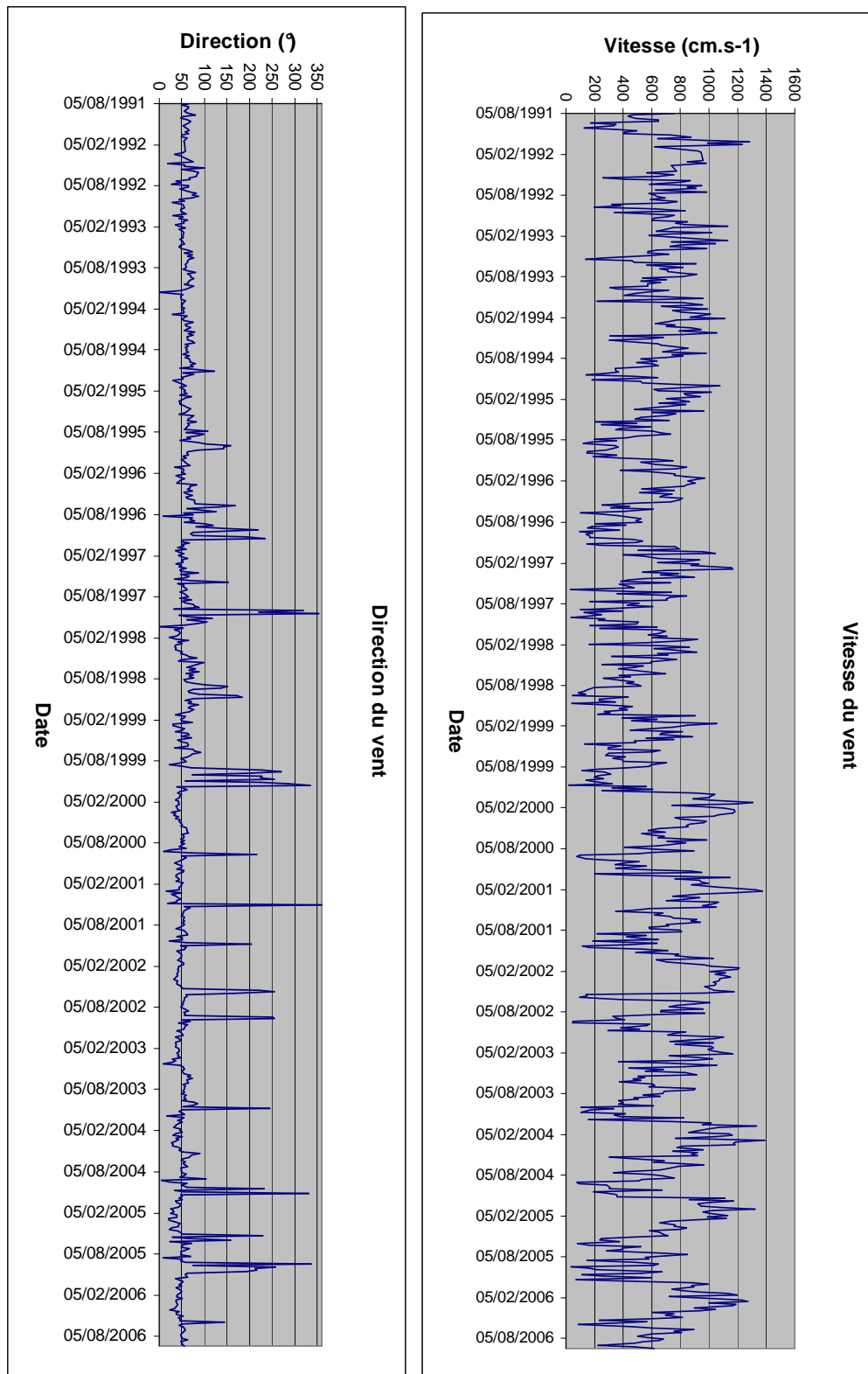


Figura 3-1. Variación de la dirección (izquierda) y de la velocidad del viento (derecha) entre 05/08/1991 y 18/09/2006 para el punto ejemplarizado (11.5°N / 75.5°W).

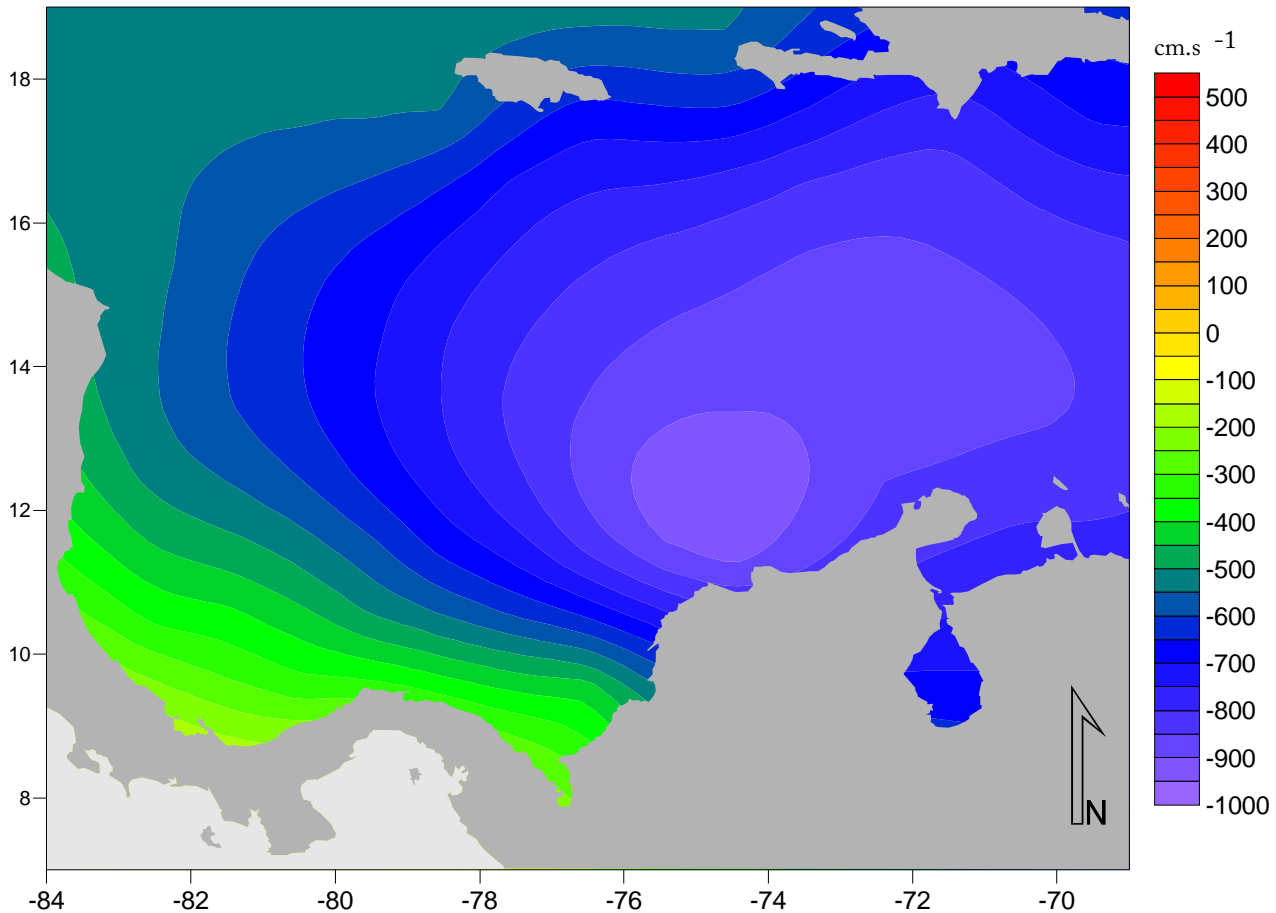


Figura 3-2. Componente zonal de la velocidad del viento en cm.s^{-1} para el mes de enero. Datos de los satélites ERS-1, ERS-2 y QUIKSCAT; resolución $1^\circ \times 1^\circ$.

También un núcleo de viento meridiano (componente N-S) que se localiza al oeste y noroeste de la SNSM, siendo los vientos en el área del macizo de velocidades entre $300\text{-}400 \text{ cm.s}^{-1}$. Teniendo en cuenta que es el área del Caribe donde este componente alcanza las mayores velocidades, sin duda tiene un significado climático regional, no bien conocido, porque anteriormente no se trabajaba con los componentes vectoriales del viento (Figura 3-3).

Como consecuencia de la actividad de los componentes vectoriales zonal y meridiano, el viento resultante (Figura 3-4) tiene un núcleo de alta velocidad $>1000 \text{ cm.s}^{-1}$, que se localiza en enero frente a Barranquilla. Sin embargo, este núcleo también se desplaza geográficamente durante el año, siguiendo el desplazamiento del núcleo de mayor velocidad del viento zonal. El área de la Sierra Nevada es influida entonces por el viento de velocidades entre $8.5 - 9.5 \text{ m.s}^{-1}$

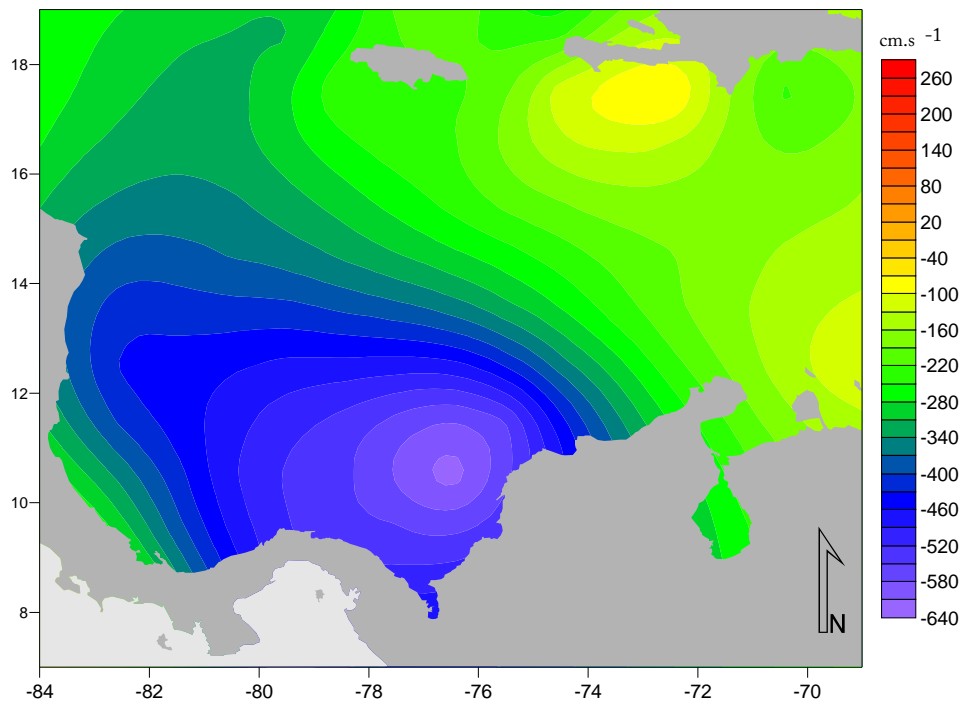


Figura 3-3. Componente meridiano de la velocidad del viento en cm.s^{-1} para el mes de enero. Datos de los satélites ERS-1, ERS-2 et QUIKSCAT ; resolución $1^\circ \times 1^\circ$.

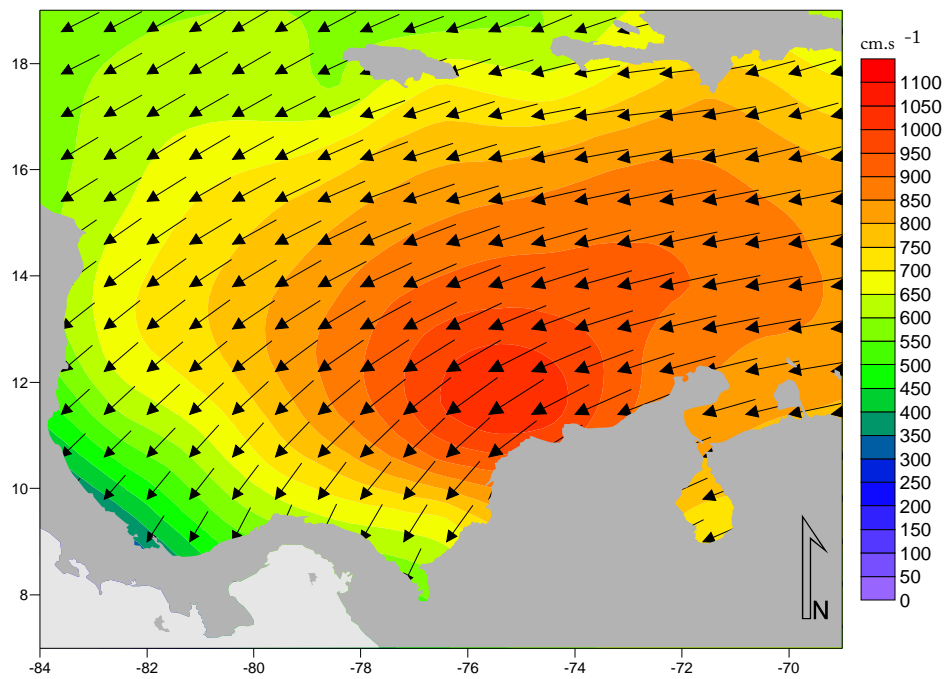


Figura 3-4. Velocidad (cm.s^{-1}) y dirección del viento ($^\circ$) para el mes de enero. Datos de los satélites ERS-1, ERS-2 y QUICKSCAT; resolución $1^\circ \times 1^\circ$

3.2. CLIMATOLOGÍA DE LA SNSM, CON BASE EN LA INFORMACIÓN ADQUIRIDA DE ESTACIONES, PLUVIOMÉTRICAS, LIMNIMÉTRICAS Y ANEMOMÉTRICAS DE IDEAM.

Los resultados sobre el análisis de la caracterización climatológica de la SNSM, con base en la información adquirida de estaciones, pluviométricas, limnimétricas y anemométricas de IDEAM, se presentan en archivo digital (CD anexo), por su volumen de información. Incluye además los datos crudos obtenidos de IDEAM en archivos con base DOS. También los archivos transformados a formato de hoja electrónica de MS Excel y los análisis de distribuciones medias anuales realizados con gráficos para cada estación, según tipo de información de un total de 90 estaciones analizadas:

- 8 estaciones anemométricas.
- 29 estaciones limnimétricas
- 53 estaciones pluviométricas

3.2.1. Estaciones Anemométricas

En la Figura 3-5 se representa la distribución espacial de las estaciones anemométricas en la SNSM. Las distribuciones temporales figuran en el CD anexo archivo Estaciones climatológicas.

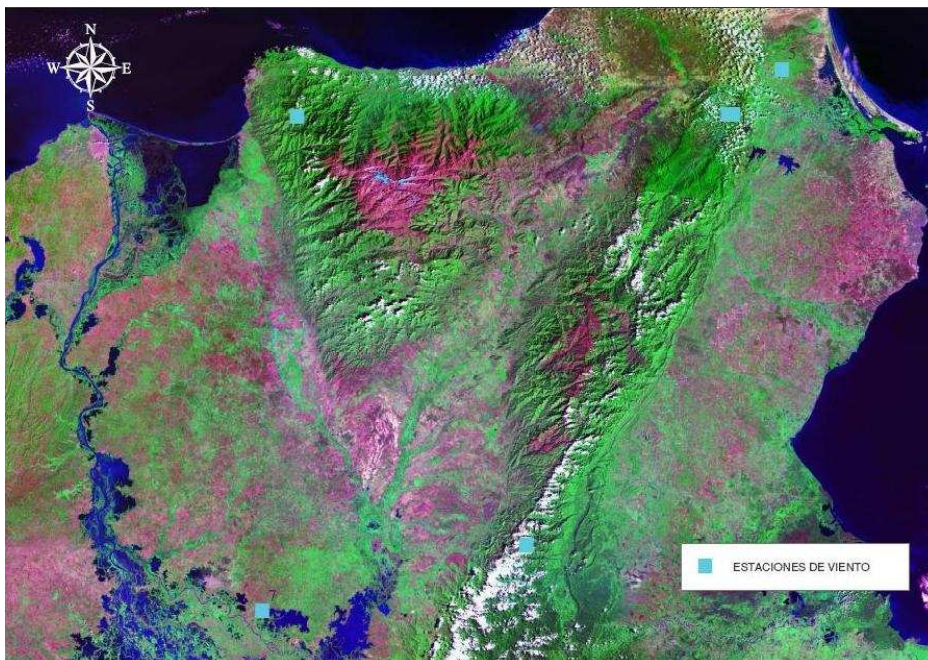


Figura 3-5. Ubicación de estaciones anemométricas en la SNSM y zonas aledañas.

Los registros de las estaciones anemométricas son bastante escasos en el macizo mismo de la Sierra Nevada y de éstos, apenas una estación se encuentra por encima de los 1000m s.n m.m., como es San Lorenzo a 2200m.

Las estaciones en la Guajira, tienen un fuerte componente E y NE, correspondiente con los vientos alisios durante el año, con velocidades entre 3-7 m/s. Por el contrario, en la estación de San Lorenzo predominan en el año las direcciones S-SE y las velocidades del viento están entre 1.4-2 m/s.

En la estación en el Departamento del Cesar, aunque más variable, la principal dirección en el año es del SE, pero también SW (abril) y W (mayo). Sólo en noviembre y diciembre se indica una dirección del E, y del NE en agosto. Las velocidades varían entre 1.5-4.5 m/s, siendo máxima en agosto.

La información disponible de la anemometría en la SNSM, no permite un análisis más profundo de la circulación del viento en el macizo.

3.2.2. Estaciones Pluviométricas

De las estaciones pluviométricas analizadas 13 corresponden a localizaciones en el macizo de la SNSM. El resto está en la periferia y sirven de referencia (Figura 3-6). El análisis de la distribución temporal se incluye en el archivo en el CD anexo "Archivo Estaciones hidrológicas".

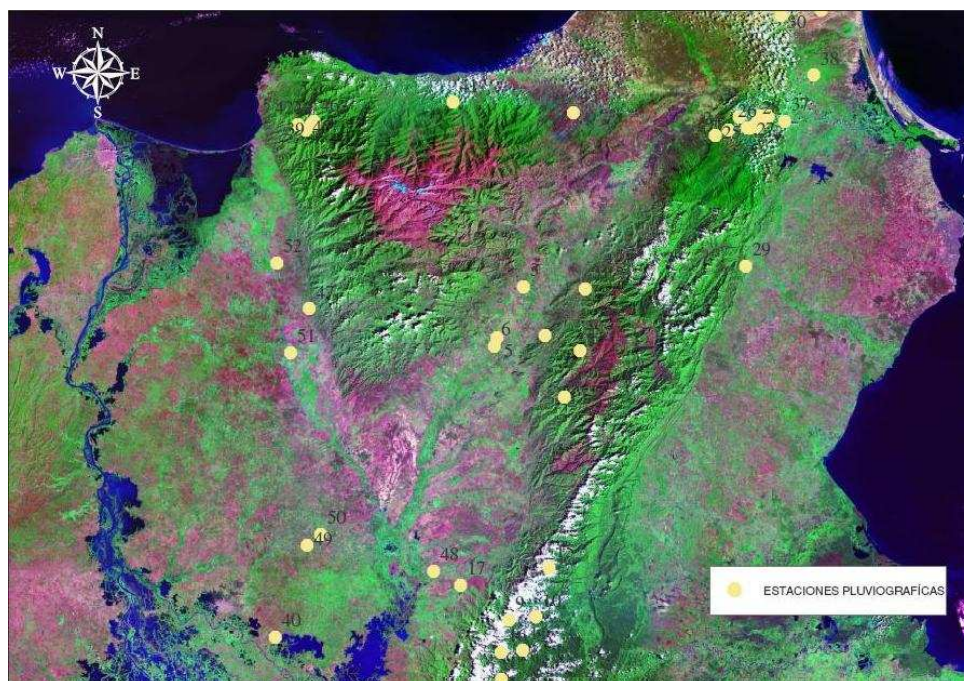


Figura 3-6. Ubicación de estaciones pluviométricas en la SNSM y zonas aledañas.

Las estaciones situadas en la Guajira muestran en general una distribución temporal de lluvias con dos máximos relativos, uno en mayo y otro en octubre (con pocas ocasiones en septiembre). En la mayoría de los casos el pico de octubre es mayor que el de mayo. Existe un mínimo relativo a mitad de año, usualmente en julio, aunque a veces ocurre en junio. Las lluvias van desde un valor anual de 280.1 mm en Uribia, a 10 msnm, hasta 1153,9 mm en Caparraipia a 500 m de elevación.

En el Dpto. del Cesar, la mayoría de las estaciones analizadas tienen registros correspondientes al sistema de Perijá y la llanura al SW. Las estaciones 3, 5 y 6 son representativas del régimen de precipitaciones en la vertiente SE de la Sierra Nevada de Santa Marta, frente al valle del río Cesar. En el año la distribución de las lluvias muestra dos máximos relativos, en mayo y octubre,

con mínimos en junio-julio. Como meses secos figuran enero, febrero y marzo. Las precipitaciones se asocian directamente con la altitud, así la estación a menor elevación (3-Guatapurí) a 50 m, muestra un valor anual de 995.3 mm; mientras en La Zona (estación 5) el valor es de 1478 mm anuales y en Pueblo Bello, a 1260 m de altitud el valor anual es de 1889-2098 mm.

Las estaciones del Dpto del Magdalena situadas sobre el macizo, presentan una distribución de lluvias diferente a los patrones ya vistos. La época lluviosa también va de abril a diciembre, pero aquí la disminución relativa para mitad de año, no es tan notoria. El primer máximo de lluvias se ubica en mayo-junio y el segundo, más importante, para septiembre. La reducción relativa en precipitaciones se define mejor en las estaciones situadas a baja altitud (<50 m); mientras que a alturas mayores (2000>), la distribución anual de precipitaciones es diferente, como también su intensidad, con una estación lluviosa al año, que se intensifica gradualmente hasta octubre, de allí baja abruptamente hasta diciembre, siguiendo la época seca, que aquí dura apenas 3 meses, de enero a marzo.

En áreas como la de Guachaca, en la cara norte de la Sierra, hay bastante variabilidad con la altitud, siendo mayor la precipitación a mayor elevación, por ejemplo, en la estación Torre de TV a 2700 msnm se registraron valores anuales máximos de 2864 mm. Sin embargo, a la misma altitud, pero a un grado de longitud de diferencia, los picos de lluvias anuales tienen un mes de diferencia. En general, en las estaciones a altitudes mayores a 450 m, las lluvias anuales sobrepasan los 2000 mm. (gráficas CD anexo, Archivo "Estaciones climatológicas").

En sectores, como a sotavento de la Sierra, cara al SW, la altura de las estaciones hasta 50 m, indican una precipitación de más de 1200 mm anuales. A mayor elevación, (100 m>), las precipitaciones aumentan al orden de los 1500 mm anuales.

No es discernible todavía, cómo puede estar influyendo el régimen de vientos, sobre el de la distribución de las lluvias en el macizo y en sus inmediaciones. A partir de los datos multianuales de precipitación mensual pueden construirse isoyetas para cada mes en el macizo en busca de una relación con el patrón de vientos alisios.

3.2.3. Estaciones Limnimétricas

A diferencia de los casos anteriores, con las estaciones anemométricas y las pluviométricas, donde los registros indican las condiciones locales, tratándose de los caudales de las corrientes originadas en la SNSM, permiten obtener datos que son la resultante de las condiciones imperantes en sitios de la cuenca de un río generalmente distantes del sitio de registro (Figura 3-7)Figura 3-7 modo que el análisis detallado de cada río, se entiende como el análisis de su cuenca, incluyendo el aporte de afluentes que pueden estar a su vez subordinados a condiciones de precipitación muy diferentes de la corriente cuyo caudal se mide en una estación dada.

En esta ocasión se hace un análisis temporal de los principales ríos que se originan en la Sierra Nevada de Santa Marta y que por tanto, dependen de las condiciones climáticas en sus respectivas cuencas y en el macizo en general.

Se graficaron los promedios mensuales de caudales (m^3s^{-1}) para su análisis y están en el archivo "219a" incluido en el CD anexo.

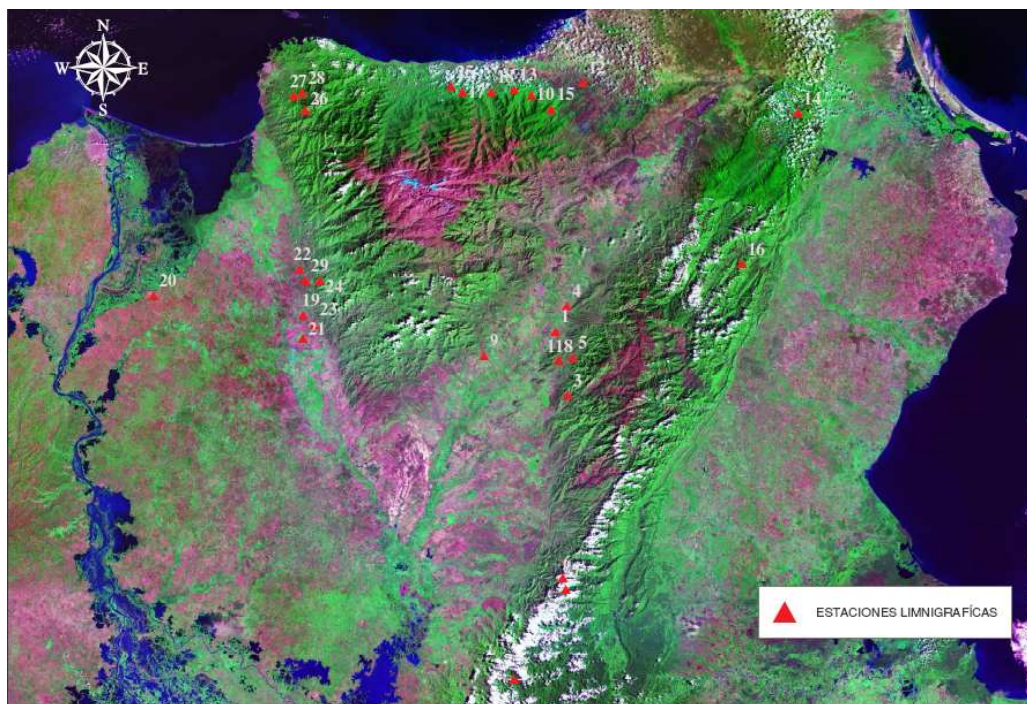


Figura 3-7. Ubicación de estaciones limnimétricas en la SNSM y zonas aledañas.

En la cara norte de la Sierra, existen 7 estaciones limnimétricas (Figura 3-7), correspondientes a un arroyo y a seis ríos, Ancho, Tapias, Palomino, Guachaca, Don Diego y Piedras. Sin embargo, para esta misma vertiente existen diferencias en los patrones de distribución anual de los caudales. En general, los menores caudales se presentan en los tres primeros meses del año, teniendo marzo el valor mínimo. En ríos como el Don Diego y el Guachaca, el incremento en los caudales es progresivo a partir de abril, con un máximo en noviembre, para decaer luego en diciembre. El río Piedras, se mantiene la mayor parte del año cerca de los $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pero tiene un agudo incremento para un valor máximo en noviembre de $11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, cuando su promedio anual es de $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Por su parte, los ríos Tapias, Palomino y Ancho, muestran estiaje durante los primeros tres meses del año y a continuación un patrón bimodal de crecientes. El primer máximo se ubica en mayo o junio, una disminución relativa en julio y otro pico mayor para octubre o noviembre seguido de un descenso rápido en diciembre, aunque sin llegar a los niveles de los meses de estiaje (Archivo "Estaciones hidrológicas" en el CD anexo).

Sobre la esquina noroccidental de la SNSM se localizan tres estaciones limnimétricas, dos correspondientes al río Manzanares y una al río Gaira. Aunque su caudal no es mucho ($<2.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), los primeros cuatro meses del año son de estiaje y se incrementa gradualmente a partir de mayo y alcanza su único máximo anual en octubre. Sin embargo, las diferencias entre los datos de dos estaciones para una misma corriente (Manzanares), son notables.

La diferencia en distancia entre estaciones es de pocos kilómetros, pero en altitud es de 20 m. El valor medio anual de caudales en la estación Bocatoma ($1.89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) es casi el doble de lo registrado en San Pedro Alejandrino ($1.06 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). En esta última estación (a 40 msnm) se asimila al patrón bimodal de crecientes, con una menor en mayo y un máximo en octubre-noviembre; mientras que en la estación Bocatoma, a 60 m de altura, es evidente un único máximo anual para octubre, parecido a lo observado con el río Gaira. Se puede suponer que el

uso del agua es mayor después de la estación Bocatoma y hasta llegar al registro de San Pedro, aguas abajo. Por esto la expresión útil para relacionar con el clima de la SNSM es la información de la estación Bocatoma ("Archivo Estaciones hidrológicas" en el CD anexo).

Sobre la vertiente suroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta se localizan 6 estaciones limnimétricas, correspondientes a los siguientes ríos: Tucurinca, Fundación, Frío, Aracataca, Sevilla y Orihueca. A excepción de la distribución monomodal de crecientes del río Frío, los demás ríos tienen una distribución bimodal de crecientes aunque los máximos relativos se presentan en meses diferentes. En el río Frío, el ascenso de los caudales a partir de mayo es gradual hasta un máximo anual único en octubre. Los ríos Orihueca y Tucurinca presentan máximos relativos de caudales en junio y octubre; mientras que el Aracataca y el Sevilla tienen sus valores pico en mayo-junio y en octubre. Por su parte, el río Fundación es el único río de los seis ríos cuyos máximos relativos se presentan en mayo y en noviembre, cuando en los demás el pico de crecientes se sitúa en octubre ("Archivo Estaciones hidrológicas" en el CD anexo).

De la cara suroriental de la SNSM, son más escasas las corrientes y las estaciones limnimétricas. Se analizaron las distribuciones de los principales ríos, Guatapurí, Badillo, Cesar y Ariguaní. En todos los casos, los meses de estiaje son los primeros cuatro del año. Los ríos Cesar, Guatapurí y Badillo con estaciones limnimétricas entre 100 y 450 msnm, presentan una distribución de crecientes bimodal, con un máximo relativo en mayo y en octubre o en noviembre. En estos tres casos la disminución del caudal para julio es notable. En esto se diferencia la distribución de crecientes en el río Ariguaní, donde el primer máximo relativo anual sucede en junio, seguido de un leve descenso en julio, ascendiendo luego rápidamente hasta su segundo máximo en octubre para disminuir también rápidamente en noviembre y diciembre. También aquí es evidente la existencia de patrones en las distribuciones de estiajes y crecientes, pero así mismo de una gran variabilidad entre los patrones. Con ríos como el Ranchería, por ejemplo, aunque la estación limnimétrica está situada en la Guajira, su variación refleja una de las anomalías en los patrones de variación temporal de sus caudales, que comienzan a aumentar desde abril, con un primer máximo de creciente en mayo-junio, una reducción relativa en agosto y otro pico en noviembre.

3.3. CIRCULACIÓN DEL VIENTO ALREDEDOR DE LA SNSM.

Teniendo en cuenta el propósito de analizar el comportamiento y la influencia del viento que llega a la Sierra desde el mar Caribe, se seleccionó la información sobre vientos de los sitios definidos como P-05 (11° 30' N / 74° 30' W), al NW de Santa Marta; P-06 (12° 30' N / 73° 30' W), frente a la costa del Dpto. de la Guajira y P-07 (12° 30' N / 72° 30' W), frente al Cabo de la Vela en la costa norte de la Guajira. Los datos del Quikscat permiten una mayor resolución de grilla: 0.5 x 0.5° y abarcan desde junio de 1999 hasta agosto de 2006. La frecuencia de registro es de cuatro a cinco días por mes, estos valores se promediaron para obtener velocidades medias mensuales y dirección promedio mensual del viento en la serie multianual.

El análisis de las variables velocidad del viento zonal, velocidad del viento meridiano, velocidad del viento resultante y dirección del viento fueron graficados para cada punto seleccionado (Figura 3-8, a, b y c). De las gráficas es aparente una asociación entre la velocidad del componente zonal (U) y la velocidad del viento resultante (W). Una asociación inversa se aprecia también entre la velocidad del componente meridiano (V) y la dirección del viento.

Un análisis de correlación mostró que es muy alta ($r= 0.99$) para las variables velocidad del componente zonal y la velocidad del viento resultante en los tres sitios. Esta relación desciende en sentido W-E, siendo menor frente a la Guajira ($r= 0.47$). Lo anterior indica que para la velocidad del viento resultante, lo que más influye es la velocidad U del componente zonal (E -> W). La correlación entre los componentes zonal y meridiano también baja en el mismo sentido, indicando que hacia la Guajira varían más independientemente, que lo que lo hacen hacia Barranquilla. A su vez, el componente meridiano adquiere importancia en la velocidad del viento resultante en sentido E -W, siendo mayor hacia Santa Marta y Barranquilla, y explicando el 88% de la variación en P-05, que hacia la Guajira, donde su intensidad es menor y el componente meridiano apenas explica un 22% de la variación anual de la velocidad del viento resultante.

Por su parte, la variación de la velocidad del viento meridiano explica en un 44% la variación de la dirección del viento ($p<0.05$) en el punto 07 cerca del Cabo de la Vela (Guajira), frente al departamento de la Guajira, punto 06, en un 59% ($p<0.01$), y en el punto 05, en un 67% ($p<0.01$). La varianza explicada por la velocidad del viento zonal es menor e insignificante en muchos casos, indicando que la dirección del viento es influida principalmente, y en los tres casos inversamente, por el componente meridiano (Tabla 3-1).

Cuando se comparan en un gráfico a la misma escala (Figura 3-9), es evidente la similitud entre el patrón multianual de la dirección mensual promedio del viento en los tres puntos. Los valores de las distribuciones de los puntos 06 y 07 son más parecidos entre sí, que con el punto 05. El análisis mostró una estrecha correlación ($r= 0.99$) entre los datos mensuales promedio de la dirección del viento en los sitios 06 y 07, mientras que la correlación es menor ($r= 0.89$) con las direcciones del sitio 05 (Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Matriz de correlación de la dirección del viento resultante (W), su velocidad (Dir) y los componentes zonal (U) y meridiano (V) en tres puntos selectos frente a la costa de la Sierra Nevada de Santa Marta (P-05, P-06 y P-07). (Datos de Quicksat)

P-05	U	V	W	Dir
U	1			
V	0,88	1		
W	0,99	0,94	1	
Dir	-0,78	-0,82	-0,78	1
P-06	U	V	W	Dir
U	1			
V	0,61	1		
W	0,99	0,71	1	
Dir	-0,52	-0,76	-0,53	1
P-07	U	V	W	Dir
U	1			
V	0,35	1		
W	0,99	0,47	1	
Dir	-0,41	-0,66	-0,40	1

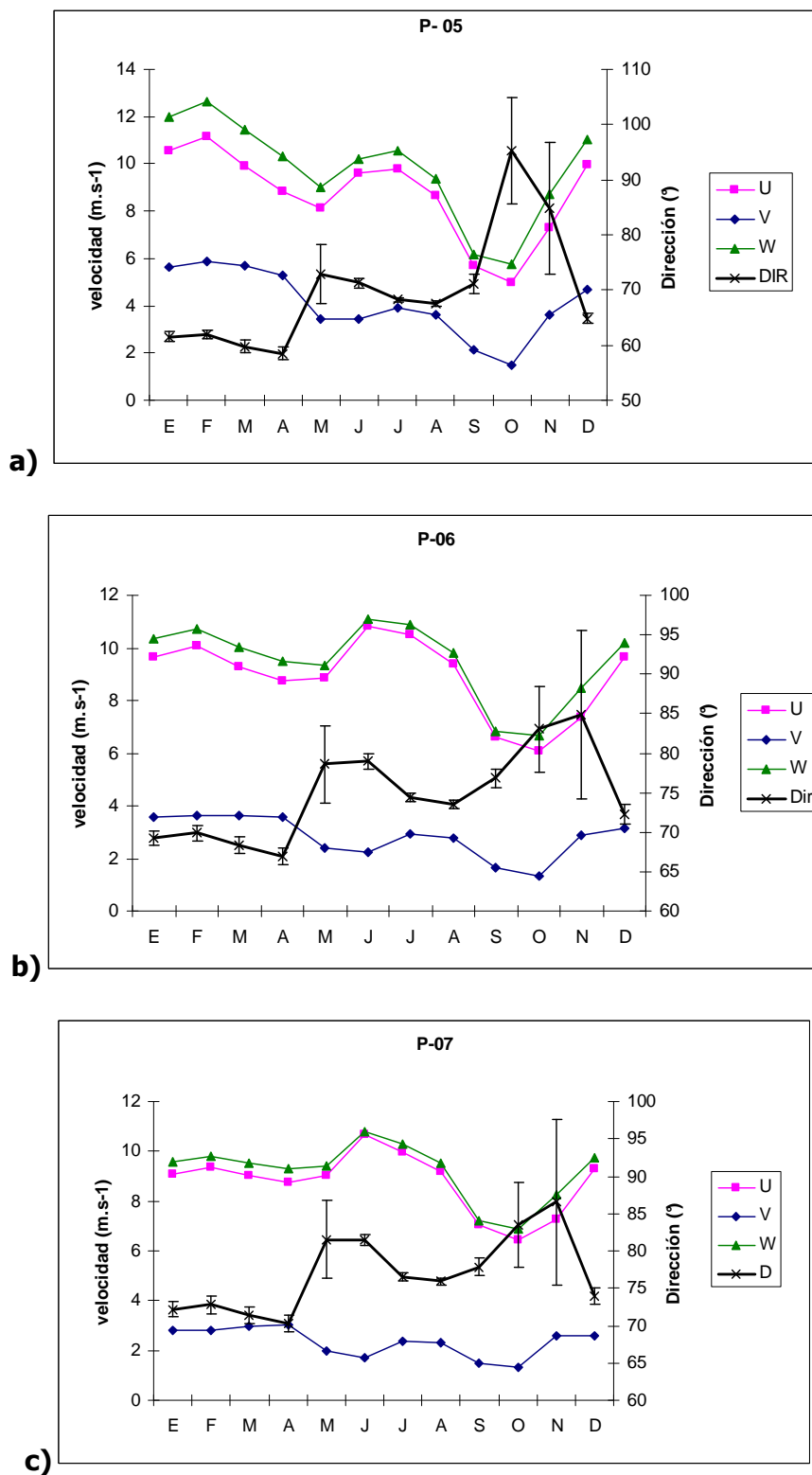


Figura 3-8. Velocidad y dirección del viento resultante (W), y de los componentes zonal y meridiano en 3 localidades, (a) P- 05, (b) P- 06 y (c) P- 08, con influencia en el sector costero de la Sierra Nevada de Santa Marta.

En ninguno de los tres sitios la dirección predominante es NE (45°), el menor valor del ángulo de dirección es de 58.5° , todavía ENE, aunque se concede un error que puede disminuir algo este valor. El patrón de la distribución de direcciones en los tres sitios es similar hasta el mes de septiembre. Tienen sus menores valores de enero a abril, luego un máximo relativo para mayo y vuelve a bajar el ángulo en julio-agosto. A partir de septiembre, los ángulos de dirección aumentan en los tres sitios; pero en el punto 05 logran el segundo máximo anual en octubre (95° , ESE); mientras que en los puntos 06 y 07 (84° - 87° , E) se presenta en noviembre. Luego el descenso es rápido, llegando en diciembre a valores bajos cercanos a los de enero-abril.

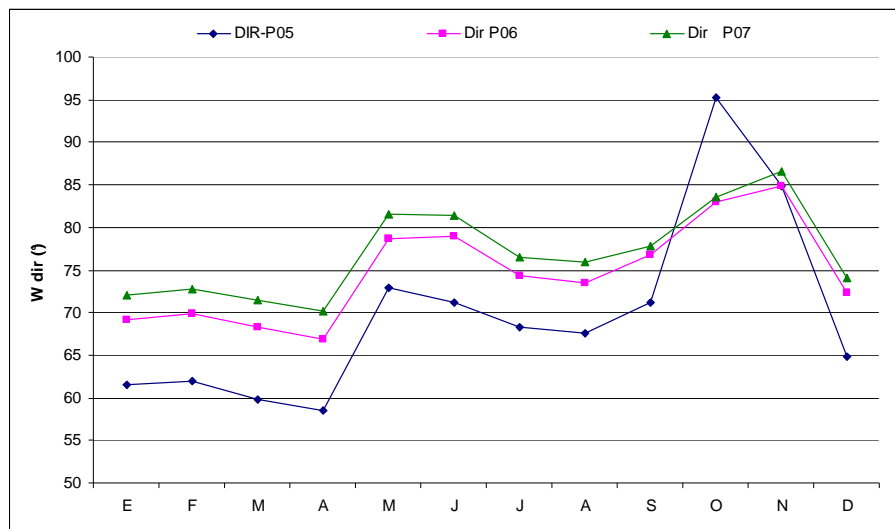


Figura 3-9. Variación anual del ángulo de la dirección del viento resultante en los tres puntos selectos (P-05, P-06 y P-07).

El patrón de variación observado con los ángulos de dirección del viento, corresponde de cerca a los patrones de distribución anual de las precipitaciones y de los caudales de los ríos de la SNSM. La detección de esta señal implica un significado en el clima anual promedio de la región, incluida la Sierra, esta señal aparentemente está asociada también al tránsito de la zona de confluencia intertropical (ZCIT) sobre el área costera.

Sin embargo, teniendo en cuenta la mayor correlación inversa del ángulo de dirección del viento, con el componente meridiano del viento V (Tabla 3-1), éste intensifica su actividad en los meses en que el ángulo de dirección es menor, o sea cuando tiende a 45° . Como resultado se tiene una mayor intensidad del viento resultante NE, cuando se acentúa el componente meridiano (N – S). Esto afecta la distribución de la nubosidad, reduciéndola al aumentar la presión atmosférica, como ocurre para diciembre-abril. Caso inverso, cuando el ángulo de dirección es mayor, con menor contribución del componente meridiano, como ocurre en los meses con mayor nubosidad y precipitaciones en la Sierra. De los trazos de error estándar en la Figura 3-8 a, b y c, se observa que la dirección del viento es más variable en los meses con máximos relativos de valor de ángulo, o sea en mayo y en octubre - noviembre. Los demás meses la variabilidad es mucho menor, tendiendo a ser más constante con ángulos menores.

3.4. EL RELIEVE TERRESTRE Y EL CLIMA LOCAL

El conocimiento del viento y su efecto sobre la SNSM, garantiza la comprensión sinóptica del clima en el macizo, teniendo en cuenta unas premisas básicas, simples y casi obvias:

- Cuando el viento viene del océano, humidifica al clima serrano; cuando proviene del continente, p.ej., de Perijá, lo seca.
- Cuando el aire se eleva, el clima es nublado y lluvioso; cuando el aire desciende hace seco al clima.
- La altitud refresca la temperatura y enfría las masas de aire, debido al gradiente adiabático térmico vertical negativo.
- Los planos inclinados (pendientes) facilitan el ascenso de las masas de aire húmedo.
- Los fluidos, como el aire, se encauzan por las vías de menor resistencia. Los valles serranos ofrecen esa condición.

Sin embargo, estas reglas generales se aplican sólo con un flujo de viento estable. En nuestro caso de los alisios y la SNSM, el flujo es turbulento e intervienen varias fuerzas. Las fuerzas que controlan al viento y a sus efectos son: La fuerza del gradiente de presión, la fuerza de Coriolis, la fuerza de flotación, y la fuerza de fricción.

Como se mencionó antes, existe el inconveniente de que no hay estaciones de registro anemométrico a altitudes mayores a 2200 m. Aunque sí de áreas en la Guajira, distantes de la SNSM. (Uribia, Maicao). Los resultados de la distribución de dirección del viento, a partir de los datos anemométricos, indican una predominancia de la dirección E durante todo el año, como muestra también la rosa de vientos de IDEAM en el aeropuerto de Riohacha:

Viento del Este:	46%
Viento del NE:	14%
Viento del N:	14%
Viento del SE:	9%

No así en los aeropuertos de Valledupar, Santa Marta y Barranquilla, donde la dirección predominante durante el año es la NE. Lo anterior implica que existe una desviación del viento del E hacia la izquierda, que lo transforma en viento de dirección dominante NE, tanto del lado SE de la Sierra, a lo largo del valle del Cesar-Ranchería, como frente a la costa, aunque las razones para esto puedan diferir.

De modo similar, el análisis de la dirección del viento en tres puntos frente a la costa de la Guajira, Magdalena y Atlántico, a partir de la información del satélite de Quikscat (1999 – 2006) mostró que el ángulo de dirección del viento, aumenta en promedio anual desde 69.8° en el punto P-05, a los 77° frente al Cabo de la Vela en la Guajira (P-07), valor más cercano a los 90° de la dirección E que trae el viento zonal desde Venezuela.

El hecho de que el viento resultante en estos puntos frente al litoral, sufra una deflexión desde la Guajira cambiando de una dirección E a ENE y relativamente próxima a NE en algunos meses del año, puede deberse a:

- La fuerza de fricción del terreno montañoso de la SNSM, que afecta por su resistencia principalmente al viento a baja altitud (850 hPa), cambiando su dirección hacia la izquierda y reduciendo su velocidad.
- El calentamiento diferencial entre el mar y la Sierra, siendo mayor y más rápido en esta última, determina que el macizo actúe como un centro de baja presión, que fuerza al viento zonal hacia la izquierda, adoptando entonces una dirección ENE y NE.
- A escala regional, el calentamiento diurno del terreno, hace subir la masa de aire próxima al suelo, provocando una baja presión continental. Como consecuencia la dirección del viento cambia al circular de una mayor presión (Guajira oriental: 1013-1011 hPa) a una menor (hacia Urabá. 1008).
- La fuerza de Coriolis, aunque baja por la cercanía al ecuador, desvía la dirección del viento hacia la izquierda, en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte.
- Por su baja altitud, el terreno del valle del Cesar-Ranchería se calienta rápidamente durante el día y le transfiere calor al aire en contacto con el suelo, que asciende generando bajas presiones y forzando al viento del E a desviarse hacia la baja presión, adoptando la dirección NE a lo largo del valle.

El viento es menos afectado por la fricción a medida que la altitud es mayor, hasta que el viento se vuelve geostrófico. Este nivel es la parte superior de la capa de fricción o de frontera ('boundary layer') y que para el caso de la SNSM pudiera estar a unos 6 km de altitud, o sea por encima de los nevados; mientras que sobre el mar estará a sólo unos 2 km.

La dirección del viento incidente sobre la SNSM y su variación anual están relacionadas significativamente con las precipitaciones y con los caudales de los ríos. Dado que la mayor parte de los vientos en el trópico son del E, los lados orientales de los continentes son más húmedos que los occidentales. El viento del este trae gran cantidad de vapor de agua del océano y que es forzado a subir provocando lluvias. Sin embargo, en el caso de la parte SE de la SNSM esto no se cumple actualmente, o por lo menos no desde que se elevó la serranía de Perijá, como veremos más adelante.

Cuando el viento circula casi paralelamente a la costa, al haber mayor fricción sobre el terreno, el viento sobre éste ingresa al continente con un ángulo más agudo que el del viento sobre el mar, pasando de una dirección ENE a NE incluso NNE. Esto lleva a una divergencia a lo largo del litoral, que causa sequía en la región costera. El viento es forzado entonces a subir por los valles de los ríos de la vertiente norte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Que se produzca o no precipitación montaña arriba dependerá también de la velocidad que tenga el viento, a mayor velocidad menos probabilidades de lluvias por mayor inestabilidad en la nubosidad, que puede ser transportada a gran distancia de la SNSM (Figura 3-10).

Debido a que durante el día la cima de las montañas se comporta como zona cálida y el aire asciende dejando espacio al aire más frío del valle y, por lo tanto, en superficie el aire circula del valle a la cima ('orographic lifting'). Por la noche, la zona más cálida es el valle, es aquí donde el aire asciende «dejando sitio» al aire más frío de la cima, y por lo tanto en superficie el aire circula de las cimas hacia los valles.

Dado que el grado de insolación sobre las laderas dependerá de la declinación solar, las que miran hacia el norte se calentarán más de marzo a septiembre y las que miran hacia el sur de septiembre a marzo. Los tiempos de cambio coinciden con los equinoccios.

El flujo del aire tiene muchas similitudes con el del agua. Puede ser *laminar* y *turbulento*. El viento laminar adopta trayectorias de hilos paralelos a la superficie terrestre, en el viento turbulento los hilos adoptan trayectorias turbulentas de carácter helicoidal. El viento se hace turbulento a partir de cierta velocidad crítica (1 metro/segundo). Además las irregularidades del relieve y la vegetación provocan turbulencias dinámicas más localizadas.

Durante las horas de insolación, las laderas de toda montaña se calientan más que las masas de aire libre al mismo nivel. Por consiguiente, se produce un centro local de baja presión a lo largo de toda la ladera, de modo que tiende a producirse un viento que sopla desde el fondo del valle, hacia la cumbre. Este efecto se ve acentuado por el hecho de que el fondo del valle es la región que más se calienta durante el día y la masa de aire sobre él tiende a elevarse, de modo que las superficies isobáricas resultan inclinadas hacia la ladera y con ello se produce un reforzamiento del viento ascendente.

En una cadena montañosa atravesada en la dirección del viento general, las láminas gaseosas se ven impelidas ladera arriba por la masa de aire en movimiento que las empuja por detrás. A su vez, la masa de aire inmediatamente encima impide una ascensión de tales láminas gaseosas en sentido vertical. Esto puede tener un efecto acelerador sobre ellas al estrecharse la sección por donde circulan.

Cuando el viento del E sopla en la esquina NE de la SNSM, bordeando la llanura guajira, ocurre también una divergencia que tuerce la dirección del viento hacia la izquierda, hacia la Sierra, al norte de Hatonuevo. Esta condición, hace que el viento resultante (incidente) tenga una dirección NE. Este viento y la erosión consecuente pudieron estar implicadas en la formación de los valles por donde hoy circulan los ríos Tapias, Carrizal, Tomarrazón y Camarones (Figura 3-10).

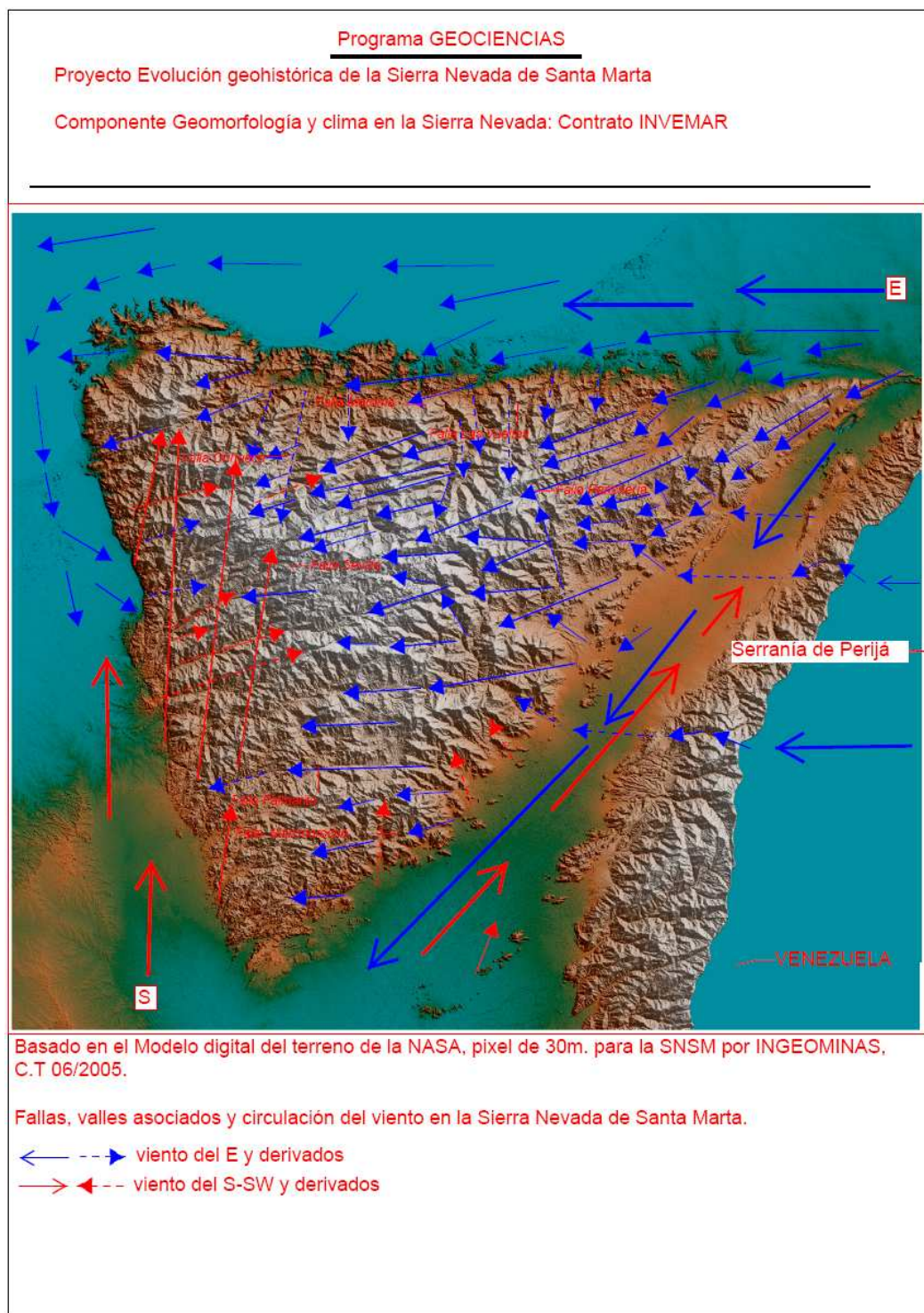


Figura 3-10. Circulación del viento alrededor de la Sierra Nevada y su dependencia de la morfología del macizo.

3.5. PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES ANUALES EN LA SNSM.

Inicialmente se separaron los datos promedio mensual de 47 estaciones pluviométricas, según su tendencia anual. En su mayoría las estaciones situadas por debajo de los 100 m de altitud presentan una distribución bimodal en la precipitación anual, con máximo para mayo, mínimo en julio y otro pico en octubre. Lamentablemente, estas estaciones pluviométricas no están localizadas en las cuencas altas de los ríos principales, sino a altitudes mucho menores, por cuestiones de acceso. Sin embargo, pueden dar una idea de la temporalidad de las precipitaciones en sitios a mayor altitud, como las estrellas fluviales por encima de los 2000 m. Se analizaron los patrones de distribución de lluvias anuales en 47 estaciones pluviométricas en y alrededor de la SNSM.

El patrón fue bimodal en la mayoría de los casos, con una distribución de lluvias que presenta un máximo relativo para mayo; un mínimo relativo corto en julio y otro máximo en octubre, generalmente mayor que el de mayo (M-J-O) ("Archivo Estaciones climatológicas" en el CD anexo).

Otro patrón de precipitaciones anuales fue con un máximo relativo de lluvia para mayo; un mínimo relativo corto en julio y otro máximo en noviembre, generalmente mayor que el de mayo (M-J-N) ("Archivo Estaciones climatológicas" en el CD anexo).

Un tercer patrón encontrado fue el de un primer máximo en mayo; un mínimo relativo en julio y otro máximo en septiembre (M-J-S) ("Archivo Estaciones climatológicas" en el CD anexo).

Un último grupo de distribuciones anuales de precipitación no se ajustaron a las clasificaciones anteriores ("Archivo Estaciones climatológicas" en el CD anexo). Son cuatro las estaciones, donde hay mínimos en junio, o prácticamente no hay disminución de enero a diciembre.

Se contrastaron con los cambios en la dirección del viento NE para los mismos meses. En 29 de 47 estaciones (62%), el patrón anual de las precipitaciones puede ser explicado entre 40% y 88% por los cambios en el ángulo de dirección del viento en el sitio 05. En 15 estaciones (32%) el patrón de variación de la dirección explica la distribución anual de las precipitaciones entre un 44%-67%. En sólo 3 estaciones (6.4%) se explica el 35% de la distribución anual de las precipitaciones por el cambio en la dirección del viento en el punto 07, frente a la Guajira. En la estación en 10,06°N – 73,09°W, a 200 m de altitud, la precipitación anual es de 2099 mm y el valor del pico de lluvias de mayo es mayor que el de octubre.

El menor valor anual de precipitaciones (280.1 mm) se presenta en la estación Uribia (Guajira) en los 12.11° N – 71.55° W, a 10 m de altitud; seguida por Arroyo Roroko, a 100 m de altitud en los 12.18°N – 71.30°W, también en la Guajira. Mientras que la mayor precipitación anual (2914 mm) se registra en el sector de Guatapurí (Cesar) (10.47° N - 73.24° W) a 1560 m de altitud. En general, teniendo en cuenta las precipitaciones anuales y la altitud, se encontró que esta última variable explica significativamente ($p < 0.01$) en un 39% la variación de la precipitación en las estaciones. De particular interés son las estaciones con precipitación mayor a 2000 mm anuales, en distintos rangos de altitud y que algunas pudieran estar sujetas a condiciones orográficas locales.

En el departamento del Cesar, la mayoría de las estaciones analizadas tienen registros correspondientes al sistema de Perijá y la llanura al SW. En el año la distribución de las lluvias muestra dos máximos relativos, en mayo y octubre, con mínimos en junio-julio. Como meses secos figuran enero, febrero y marzo.

Las estaciones del departamento del Magdalena situadas sobre el macizo, presentan una distribución de lluvias diferente a los patrones ya vistos. La época lluviosa también va de abril a diciembre, pero aquí la disminución relativa para mitad de año, no es tan notoria. El primer máximo de lluvias se ubica en mayo-junio y el segundo, más importante, para septiembre. La reducción relativa en precipitaciones se define mejor en las estaciones situadas a baja altitud (<50 m); mientras que a alturas mayores (2000>), la distribución anual de precipitaciones es diferente, como también su intensidad, con una estación lluviosa al año, que se intensifica gradualmente hasta octubre, de allí baja abruptamente hasta diciembre, siguiendo la época seca, que aquí dura apenas 3 meses, de enero a marzo.

En áreas como la de Guachaca, en la cara norte de la Sierra, hay bastante variabilidad de la precipitación con la altitud, siendo mayor a mayor elevación; por ejemplo, en la estación Torre de TV a 2700 msnm se registraron valores anuales máximos de 2864 mm, (comparables a los de Guatapurí en el Departamento del Cesar). Sin embargo, a la misma altitud, pero a un grado de longitud de distancia, los picos de lluvias anuales tienen un mes de diferencia. Desafortunadamente apenas se cuenta con pocos años de observación antes de que se suspendieran los registros en esta estación, como para hacer inferencias válidas. En general, en las estaciones a altitudes mayores a 450 m, las lluvias anuales sobrepasan los 2000 mm.

3.6. RÍOS PRINCIPALES EN LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA.

En la SNSM existe una estrecha correlación entre las direcciones de las fallas y los valles formados por los ríos, razón por la cual se hace un análisis del comportamiento estructural y la posición de los principales núcleos hidrográficos.

3.6.1. Los Fallamientos de la SNSM y su Orientación

Una de las características más destacadas en el relieve de la SNSM son los conjuntos de fallas geológicas orientadas en la misma dirección del viento predominante. El análisis de imágenes de satélite LANDSAT, y de Google Earth de la SNSM y del mapa geológico de reconocimiento de la SNSM (INGEOMINAS, 1969), así como la Interpretación estructural del mosaico TM SNSM (INGEOMINAS) permitió diferenciar los sistemas de fallas en la Sierra Nevada, su orientación (Tzchanz et al., 1969) y su relación con los núcleos pluviales. Estos sistemas de fallas, asociados a la Falla Santa Marta-Bucaramanga al occidente y a la falla de Oca, por el norte, dieron lugar a valles por los que actualmente circula el viento y se transporta la humedad.

En la vertiente occidental están, de sur a norte:

Falla Ariguanicito, falla Bellavista, falla Tucurinca – falla Cintama, falla Mindigua, falla Sevilla, falla Botella – falla Corea – falla Don Diego, falla Orihueca. Las primeras conducen humedad al área de los nevados y las tres últimas al sistema pluvial de San Lorenzo (2200 -2500 m).

En la vertiente norte, de este a oeste se encuentran:

Falla Jordán – falla El Carmen, falla Buritaca, falla Maroma, falla Las Vueltas, falla San Antonio, falla San Miguel y falla San Francisco. Estas tres últimas fallas se escalonan en orden de altitud ascendente. Sin embargo, manteniendo el enfoque de que el flujo del viento es conducido hacia arriba por los valles asociados a las fallas (y a los ríos) se pueden distinguir trayectorias conectadas de la vertiente norte con la vertiente oeste. Así:

Falla Tucurinca – falla Nevada con falla San Francisco

Falla Mindigua con falla Palomino y falla San Antonio

Falla Sevilla, con falla Don Diego y falla Las Vueltas

Falla Botella – falla Corea con falla Maroma

Falla Orihueca, que de un rumbo de 30° pasa a aproximadamente 70°, al torcerse a la altura de San Lorenzo, hacia el E en dirección a la falla Las Vueltas.

De manera que entre las vertientes occidental y norte de la SNSM existen las condiciones de relieve adecuadas para conducir viento húmedo, tanto del ENE, como del S-SW, que así confluye en núcleos de precipitaciones coincidentes con estrellas fluviales, como San Lorenzo. Tzchanz, et al. (1969) mencionan la existencia en el tercio noreste del macizo de franjas orogénicas paralelas de dirección N70E, formadas probablemente en el Pérmico y después (Provincia de Sevilla y Provincia de Santa Marta) hasta el Paleoceno. La orientación de las franjas coincide con la de las fallas y con la dirección del viento ENE (70°) en el sector norte. Similarmente se refieren al alineamiento arqueado de Sevilla, con fallas de rumbo N15E que, luego de dislocaciones, corresponden a las fallas actuales y que sirven de conducto ascendente al aire húmedo proveniente del S y SW de la SNSM.

Si el alineamiento arqueado de Sevilla controló la evolución geológica desde el Pérmico al Paleoceno, desde entonces las condiciones estuvieron dadas para que las fallas asociadas pudieran conducir por sus valles, humedad del mar hasta las cumbres del macizo. La falla curvada de Orihueca que cambia de un rumbo de N30E a uno de N70E al SE de la Cuchilla de San Lorenzo, es representativa de esta condición. Sin embargo, el proceso erosivo que llevó a formar los valles asociados a las fallas pudo demorar millones de años, antes de conformar los sistemas de hoy. Según Tzchanz et al. (1969) los lineamientos ancestrales con rumbos N70E y N15E pudieron ser heredados del cratón antiguo desde el Pérmico y se refiere a cambios en el alineamiento de Maroma entre el Jurásico medio y el Cretácico superior, considerándolo como parte oriental del sistema arqueado de Sevilla.

3.6.2. Los Núcleos Fluviógenos

Analizando los sitios con mayor frecuencia de entrecruzamiento de fallas geológicas y de valles asociados a éstas y a los ríos, así como la presencia de nacederos de los ríos principales de la SNSM, se logró identificar ocho núcleos, ubicados sobre las tres aristas del macizo piramidal. (Figura 3-11)

Núcleo N1. – Minca (450 – 1000 m)

Núcleo N2. – San Lorenzo (2000 – 2500 m)

Núcleo N3. – Sevilla (2400 – 4500 m)

Núcleo N4. – Aracataca (3600 – 4000 m)

Núcleo N5. – Ariguaní (1300 – 2200 m)

Núcleo N6. – Guatapurí (4000 – 5000 m)

Núcleo N7. – Ranchería (3100 - 4000 m)

Núcleo N8. – Cañas (1530 – 2500 m)

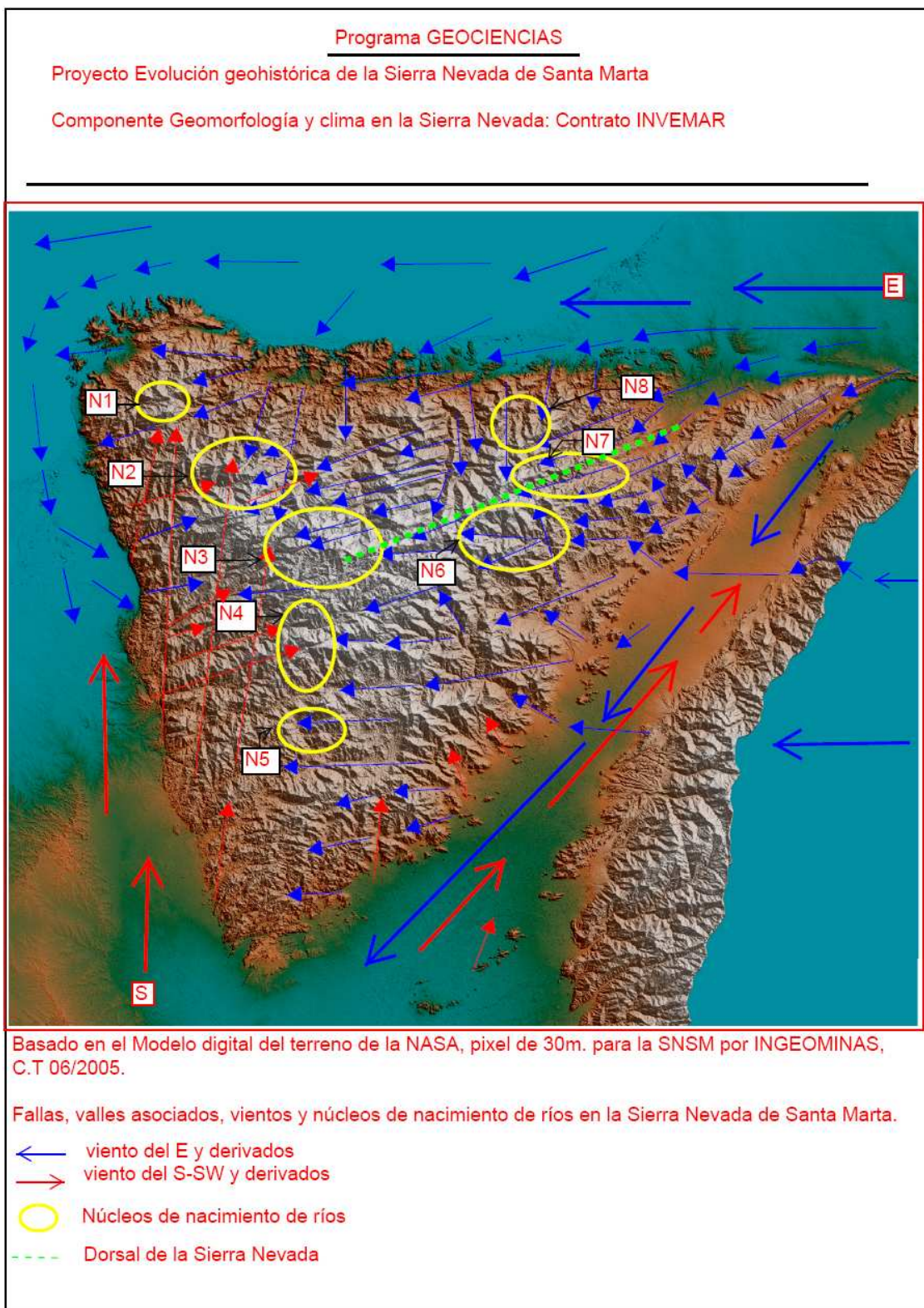


Figura 3-11. La geomorfología general de la Sierra Nevada y su asociación con la circulación del viento, núcleos de nacimiento y cuencas de los principales ríos del macizo.

Desafortunadamente no se dispone de información meteorológica y pluviométrica de todas estas localidades, pero se analizan las disponibles.

3.6.2.1 Núcleo N1. – Minca.

Se localiza a una elevación relativamente menor, entre 450 y 1000 m, teniendo como epicentro a Minca (11°08' N / 74°06' W) a 700 m de altitud. La nubosidad y la precipitación allí alimentan pequeñas quebradas (Tamacá, Mercedes, Tigrera, Bureche) con crecidas invernales y arroyos, que en tiempos pasados pudieron ser más caudalosos y permanentes, pero que aún hoy día ponen en emergencia de inundación a áreas urbanas del sector de Santa Marta y El Rodadero.

3.6.2.2 Núcleo N2. – San Lorenzo.

El epicentro de este núcleo más amplio, se localizó en el sitio de las torres de TV (11°07' N / 74°02' W) a 2240 m de altura. La única estación de IDEAM en un nacedero fluvial en SNSM con registro de datos anemométricos y pluviométricos, es la de San Lorenzo a 2200 m de altitud. Las condiciones son ilustrativas de la relación entre el clima y la geomorfología en la Sierra Nevada de Santa Marta a altitudes mayores de 2000 m (Figura 3-11).

En la cuchilla de San Lorenzo converge principalmente la falla curva de Orihueca a la cual se asocian los valles de los ríos Riofrío y Córdoba, tiene una orientación aproximada de N35E sobre el lado suroccidental de la SNSM. Antes se mencionó la presencia de divergencias a este lado de la Sierra, que contribuyen a acarrear humedad del mar, del sistema Ciénaga Grande y zona bananera hacia arriba con el viento conducido por estos valles. Asimismo, conducen masas de aire cargadas de humedad de origen continental, cuando actúan los vientos del S-SW, principalmente de junio a noviembre, hasta San Lorenzo. Sin embargo, luego de curvarse la falla adopta dirección cercana a los 90°, y luego los valles asociados toman continuidad con los vinculados a las fallas Las Vueltas y falla Maroma a menor altitud, tornándose capaz de conducir vientos húmedos de la vertiente norte de la Sierra, también hasta San Lorenzo.

Adicionalmente está la convergencia de valles más cortos, pero convergentes a la altura de San Lorenzo, asociados a un complejo de fallamientos menores. De modo que las condiciones climáticas de San Lorenzo, que permiten la existencia de un sistema principal de nacimiento de ríos, dependen de la capacidad de conducción de aire húmedo montaña arriba por los valles que se entrecruzan, asociados a fallas del lineamiento arqueado de Sevilla.

La distribución anual del viento en esta estación indica que solamente en enero y marzo la dirección del viento es NE; mientras que en febrero, agosto, septiembre y octubre la dirección predominante es E, indicando una mayor influencia del viento zonal. Durante abril y en noviembre actúa la dirección sur y en mayo, junio, julio y noviembre predomina el viento del SE, mostrando la contribución del viento y la humedad de origen continental. Los datos de la estación mostraron baja correlación con los tres puntos de referencia del viento incidente sobre el mar P-05 ($r= 0.20$), P-06 ($r= 0.34$) y P-07 ($r=0.37$), lo cual se esperaba dado que en seis meses del año domina el viento de dirección E-NE, y durante otros seis el de dirección S-SE.

Por su parte, la distribución de las lluvias en San Lorenzo mostró correlación significativa ($r= 0.67$) ($F_{11}: 8.08$, $p< 0.05$) con el patrón de dirección del viento en el punto P- 06, de manera que a mayor ángulo -de mayo a noviembre- mayor precipitación y viceversa. Sin embargo, la variación en el ángulo de dirección apenas explica el 48% de la variabilidad de las precipitaciones. Mayores correlaciones se observaron con las precipitaciones mensuales en el sitio llamado Guachk2 (11°07'N / 74° 08'W) a 900 m de altitud y cercano a San Lorenzo (11°

07'N / 74°03'W). En ese punto, el 74% de su variación anual es explicado por el cambio en la dirección del viento en el punto P-06, al NE del Dpto. del Magdalena. (Tabla 3-2).

Al analizar la correspondencia entre la distribución anual de precipitaciones y la variación de los caudales de los ríos principales con nacimiento en el sector de San Lorenzo, Manzanares, en la bocatoma y en San Pedro Alejandrino, Gaira, Guachaca y Piedras, la matriz de correlación usada mostró su mayor valor ($r= 0.90$) entre la precipitación en la estación de Quebrada Bachicha (11°08'N / 74°02'W) a 640 m de altitud en el sector de San Lorenzo, y el caudal del río Gaira, que nace allí, con una varianza explicada de 82% ($F_{1,11}= 44.16$, $p<<0.01$).

Tabla 3-2. Matriz de correlación entre la dirección del viento, precipitación en estaciones (cursiva) y caudales medios de los ríos del núcleo 2.

	<i>Dir-P05</i>	<i>Torrvt</i>	<i>V. Nieves</i>	<i>P. Guachak</i>	<i>Q. Bchicha</i>	<i>S. Lorenzo</i>	<i>B Manzanares</i>	<i>A Manzanares</i>	<i>Gaira</i>	<i>Guachaca</i>	<i>Piedras</i>
<i>Dir-P05</i>	1										
<i>Torrvt</i>	0,62	1									
<i>V. Nieves</i>	0,61	0,98	1								
<i>P. Guachak</i>	0,76	0,93	0,87	1							
<i>Q. Bchicha</i>	0,73	0,93	0,96	0,89	1						
<i>S. Lorenzo</i>	0,61	0,98	0,99	0,90	0,97	1					
<i>B Manzanares</i>	0,89	0,62	0,60	0,76	0,77	0,64	1				
<i>A Manzanares</i>	0,83	0,42	0,37	0,64	0,57	0,42	0,94	1			
<i>Gaira</i>	0,82	0,78	0,78	0,84	0,90	0,81	0,95	0,82	1		
<i>Guachaca</i>	0,76	0,50	0,41	0,75	0,54	0,46	0,84	0,92	0,76	1	
<i>Piedras</i>	0,49	0,00	-0,10	0,32	0,08	-0,04	0,61	0,82	0,41	0,84	1

Así también, el caudal del río Manzanares (en estación bocatoma) (11°15'N / 74° 08'W) a 60 m de altitud, con la precipitación en Q. Bachicha mostró una correlación alta ($r= 0.77$), con una varianza explicada de 59% ($F_{1,11}= 14.53$, $p<<0.01$). No fue este el caso con el caudal del Manzanares medido en San Pedro Alejandrino (11°14'N / 74° 11') a 20 m de altitud, cuya correlación fue sólo de 0.57 y no significativa ($p>0.05$), explicando sólo el 32% de la variación anual del caudal. Estas diferencias con respecto a una misma corriente son indicativas, no de la variabilidad en las precipitaciones en el nacedero del río en el sector de San Lorenzo, sino del uso que se hace del agua antes de las estaciones de medida del caudal, con sólo 40 m de diferencia en altitud.

En general los ríos Gaira y Manzanares (en Bocatoma) están altamente relacionados con las precipitaciones en todos los sitios del sector San Lorenzo (Tabla 3-2). Por su parte el río Guachaca muestra mayor relación con la precipitación en la estación GUACHK ($r= 0.75$), que explica significativamente ($F_{1,11}: 12.75$, $p < 0.01$) el 56% de su variación anual de caudal. Hay que tener en cuenta que al río Guachaca tributan corrientes menores que afectan los registros de caudales.

A su vez, el río Piedras es el que menor correlación muestra con las precipitaciones en sitios próximos a su nacimiento en el núcleo San Lorenzo (N2) (Figura 3-11). Sólo en el caso de la estación GUACHK mostró alguna relación ($r= 0.32$); mientras que con las demás estaciones la correlación fue muy baja e incluso inversa. Esto lleva a pensar que los valores de caudales del río Piedras, medidos en la estación limnigráfica a 50 m de altitud, están reflejando la influencia de corrientes secundarias menores que tributan a este río y que afectan considerablemente su caudal, como para alejarse del comportamiento en su nacimiento.

3.6.2.1. Núcleo N3 – Sevilla.

Se presenta sobre la misma arista de sentido NW de los dos anteriores, pero a mayor altitud, entre los 2400 y 4500 m. Se localiza en un área de unos 26 km², con epicentro en el nacimiento del río Sevilla (10° 54' N / 73° 53' W) a 3970 m (Figura 3-11). En este núcleo tienen su nacimiento los ríos Frío, Sevilla, Tucurínca, Orihueca y Don Diego. Allí confluyen los valles correspondientes a las fallas de Sevilla, Mindigua y Tucurínca desde el lado oeste y las fallas Palomino, Don Diego y San Miguel desde el norte de la SNSM.

Existe una alta y muy significativa correlación ($p < 0.01$) (Tabla 3-3) en el patrón anual de variación de los caudales medios de los cinco ríos, y esto se asume como indicativo de una similitud de condiciones de origen, cuya respuesta es una norma parecida durante el año en todos los casos.

Tabla 3-3. Matriz de correlación entre la variación anual de los caudales de los ríos del Núcleo 3, entre ellos, con la dirección media mensual del viento en el área P-05 y con la precipitación mensual promedio en la estación Tucurínca a 450 m de altitud. Todos los valores son muy significativos ($p < 0.01$).

	<i>R. Frío</i>	<i>Sevilla</i>	<i>Tucurínca</i>	<i>Dn. Diego</i>	<i>Orihueca</i>	<i>DIR-P05</i>	<i>pttTucurínca</i>
<i>R. Frío</i>	1						
<i>Sevilla</i>	0,98	1					
<i>Tucurínca</i>	0,95	0,95	1				
<i>Dn. Diego</i>	0,95	0,91	0,95	1			
<i>Orihueca</i>	0,99	0,97	0,97	0,95	1		
<i>DIR-P05</i>	0,85	0,83	0,91	0,85	0,90	1	
<i>pttTucurínca</i>	0,77	0,82	0,83	0,67	0,81	0,72	1

Se observa mucha correlación, entre la variación del caudal de los ríos Sevilla, Frío y Orihueca, que tienen nacedores relativamente cercanos entre sí, lo cual no deja de ser notable, si se tiene en cuenta que son corrientes con bastante uso de sus aguas. La correlación con el patrón anual de variación en la dirección del viento en el punto P-05 es alta y significativa con la variación de

los caudales de todos los ríos de este núcleo N3, especialmente con los ríos Tucurinca y Orihueca (Tabla 3-3).

Sin embargo, la asociación entre las precipitaciones en la estación Tucurinca (10° 39' N / 74°04' W) a 450 m de altitud con la dirección del viento en el punto P-05, no es tan alta ($r= 0.72$), explicando apenas un 52% de la variabilidad anual. Tampoco con los caudales de los ríos en N3, posiblemente debido a la considerable diferencia de altitud con el núcleo de nacimiento de los ríos por encima de los 2400 m. La menor relación con las precipitaciones en la estación Tucurinca fue con el caudal medio anual del río Don Diego ($r= 0.67$), explicando apenas un 45% de su variación. Probablemente los aportes pluviales y de tributarios menores que recibe este río a lo largo de su cuenca, hasta desembocar en el mar por el lado norte de la Sierra, expliquen mejor estas diferencias en comportamiento con relación a los demás ríos del núcleo 3. Esta posibilidad se refuerza al observar que el río Don Diego muestra un pico de caudal para noviembre a diferencia de los demás ríos del núcleo 3, que lo tienen en octubre.

3.6.2.2. Núcleo N4. – Aracataca.

En este núcleo nacen dos de los principales ríos de la Sierra Nevada en su vertiente occidental, el río Fundación y el río Aracataca. La correlación entre los caudales medios en el año ($r= 0.99$) (Tabla 3-4), es indicativa de la correspondencia entre ambas corrientes, sugiriendo una homogeneidad de condiciones en sus orígenes a 3.600 – 4000 m de altitud, aunque se encuentren algo separados.

Tabla 3-4 Correlación entre los caudales de los ríos que nacen en el núcleo 3 y con el patrón de dirección del viento en el punto P-05

	<i>Aracataca</i>	<i>Fundación</i>	<i>DIR-P05</i>
<i>Aracataca</i>	1		
<i>Fundación</i>	0,99	1	
<i>DIR-P05</i>	0,91	0,90	1
Varianza explic. P-05	0,81	0,81	

Las variaciones anuales de los caudales muestran también alto grado de asociación con el patrón anual de dirección del viento en el punto P-05, que estaría explicando hasta el 81% de la variabilidad anual de estas corrientes. Como en casos anteriores, es notable la relación con los cambios de dirección del viento, aún en un punto, sobre el mar, en donde su circulación no es tan influida por el relieve, como lo es en la Sierra misma (Figura 3-12).

No fue viable en esta ocasión, disponer de datos de precipitaciones locales próximas a este núcleo, seguramente por su altura, que pudieran correlacionarse con la variación de los caudales de este núcleo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que también se trata de corrientes muy intervenidas y de mucho uso agrícola, con cuencas relativamente deterioradas.

3.6.2.3. Núcleo N5. – Ariguani.

En este núcleo, localizado sobre la arista de sentido SW de la Sierra Nevada, tiene origen el río Ariguani, el principal de este sector de la Sierra a pesar de que su caudal medio anual no es sino de apenas 1.4 m s^{-1} . Los valles aquí están asociados a fallas que se continúan desde el oeste, la

Falla Ariguanicito con la Falla Palmarito y más hacia el este con la Falla Las Minas. No se tienen datos de otras corrientes importantes cercanas a este río, que nace a unos 2200 m de altitud en cercanías de Pueblo Bello (Cesar).

De este sector se cuenta con información pluviométrica de tres estaciones de IDEAM a diferentes altitudes; sin embargo, la situada a menor altura difícilmente podría reflejar las condiciones de precipitaciones cerca del núcleo 5. Probablemente las estaciones cercanas a Pueblo Bello representan mejor las condiciones, por esto se utilizaron sus datos de precipitación para el análisis de correlación con el caudal del río Ariguaní. De éstas, una se localiza a 1260 m de altitud (P. Bello) y la otra a 1000 m (PB-mil). Esta última, a pesar de estar a menor altitud, mostró la mayor relación ($r= 0.70$) (Tabla 3-5) con el caudal del Ariguaní. Por su parte, la dirección del viento en el punto P-05 estaría explicando el 76% de la variabilidad observada en el caudal y el 55% de la variación en precipitaciones en la estación PB-mil.

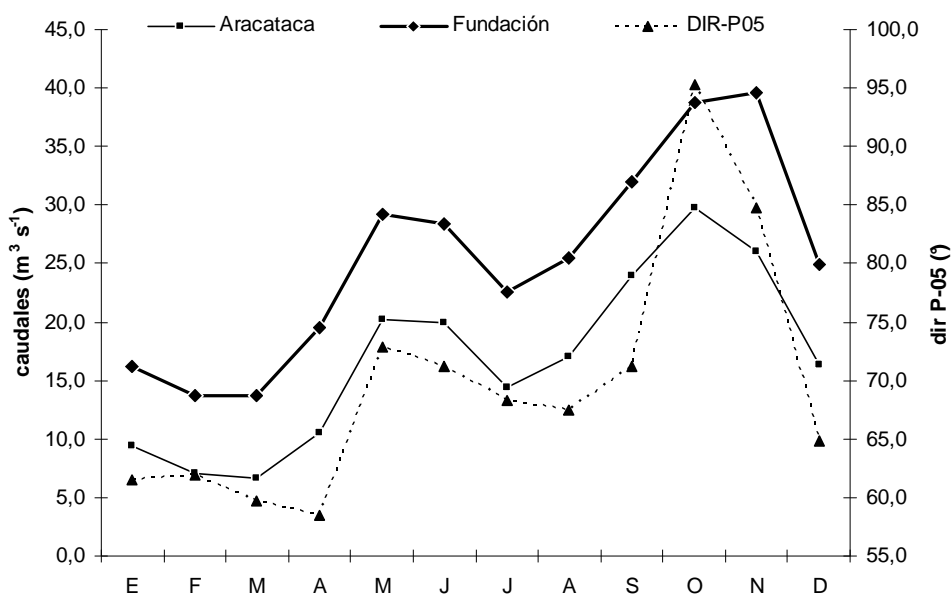


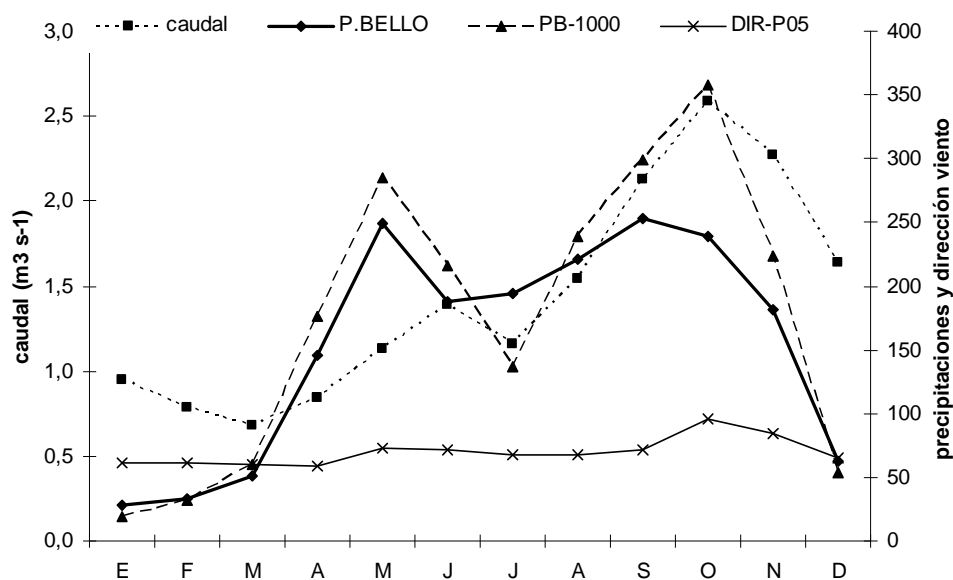
Figura 3-12. Variación anual media de los caudales de los ríos originarios del Núcleo 4, Aracataca y Fundación. El pico de octubre para el Aracataca, coincide con el mayor ángulo de dirección del viento (°) en P-05. En el Fundación el máximo relativo ocurre en noviembre.

El mayor pico anual de caudales del Ariguaní se presenta en octubre (Figura 3-13), coincidiendo con el mayor ángulo en la dirección del viento (95.2°) en el punto P-05. (Figura 3-11). Inversamente, los menores valores de caudales se observan en concordancia con los menores valores de dirección del viento, próximos a 60°.

Como en núcleos anteriores, es de esperar que se encuentren mayores correlaciones contando con datos registrados en proximidades de los nacimientos de los ríos. A causa del relieve tan quebrado de la SNSM, las precipitaciones orográficas pueden variar mucho de un sitio a otro, aún dentro de un mismo sector.

Tabla 3-5. Matriz de correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en el núcleo 5 entre caudal del Ariguani, precipitaciones en Pueblo Bello y dirección del viento en el punto P-05.

	<i>caudal Ariguani</i>	<i>P.Bello</i>	<i>PB-mil</i>	<i>DIR-P05</i>
<i>caudal Ariguani</i>	1			
<i>PTTN</i>	0,60	1		
<i>PPTN mil</i>	0,70	0,95	1	
<i>DIR-P-05</i>	0,87	0,62	0,74	1

**Figura 3-13. Variación anual del caudal del río Ariguani, las precipitaciones (mm) cerca del Núcleo 5 y del viento (°) en el punto P-05.**

3.6.2.4. Núcleo N6. – Guatapurí.

Este núcleo de origen de ríos se localiza cerca de la arista en sentido ENE de la SNSM, sobre una línea 'dorsal' divisoria de aguas (Figura 3-11) ($10^{\circ}49' N / 73^{\circ} 38' W - 10^{\circ} 52' N / 73^{\circ} 28' W$) a una altitud entre 4000 y 5000 m. Allí nacen dos ríos muy importantes para toda la vertiente SE del macizo, los ríos Guatapurí y Cesar; y dos de los más importantes de la vertiente norte, como el río Ancho y el río Palomino; sin embargo, en sus orígenes comparten condiciones similares. Lo anterior se deduce de las altas correlaciones ($p < 0.01$) encontradas en los patrones anuales de variación de los caudales de los 4 ríos (Tabla 3-6).

La correlación con la precipitación en la estación Guatapurí ($10^{\circ} 47' N / 73^{\circ} 24' W$) a 1560 m de altitud, que en el año llega a 2914 mm es mayor con el río del mismo nombre; mientras es menor con el río Palomino. Este patrón de precipitación anual explica la variación del caudal del río Guatapurí en un 67%; mientras que un 61% de la variación en los ríos Cesar y Ancho, y apenas el 38% del río Palomino. Sin embargo, hay que considerar las distancias entre la

estación de registro de las precipitaciones y las de los caudales de los ríos, en estos trayectos puede sumarse mucho 'ruido' a la señal de los caudales.

Tabla 3-6. Matriz de correlación de caudales de los ríos, precipitación (PPTN) y dirección del viento en el punto P-06, asociados con el núcleo N6. La mayoría son estadísticamente muy significativas ($p < 0.01$)

	<i>Guatapurí</i>	<i>Cesar</i>	<i>Ancho</i>	<i>Palomino</i>	<i>Dir P06</i>	<i>PPTN</i>
<i>Guatapurí</i>	1					
<i>Cesar</i>	0,97	1				
<i>Ancho</i>	0,97	0,99	1			
<i>Palomino</i>	0,92	0,94	0,95	1		
<i>Dir P06</i>	0,92	0,95	0,93	0,90	1	
<i>PPTN</i>	0,82	0,78	0,78	0,62	0,65	1

Es notable la significativa correlación de los caudales de los 4 ríos de este núcleo con el patrón anual de variación del ángulo de dirección del viento en el punto P-06, relativamente distante, explicando entre el 81% (Palomino) y el 90% (Cesar) de su variación. Sin embargo, no es así con la precipitación en la estación Guatapurí. Se supone una mayor influencia del tipo de circulación del viento registrado en P-06, más de tendencia ENE. En todos los casos los mayores ángulos en la dirección, como por ejemplo en octubre y noviembre, estuvieron asociados con picos de caudales y de precipitaciones, indicando un patrón repetible entre los años.

En el caso de este núcleo hay que tener en cuenta que se encuentra afectado por condiciones particulares de circulación del viento y del transporte de humedad, que se detallarán más adelante, y que marcan una diferencia con lo observado con los núcleos anteriores, más relacionados con las vertientes norte y oeste de la SNSM.

3.6.2.5. Núcleo N7. – Ranchería.

Se localiza al NE del núcleo 6 y comparte algunas condiciones topográficas con éste, así como de circulación del viento. Por allí transcurre la línea divisoria de aguas, 'dorsal' a la Sierra, mencionada antes (Figura 3-11) y asociada con la arista NE del macizo. El viento asciende, ya con dirección NE, por una continuidad de valles en esta dorsal hasta alturas de más de 4000 m. Las imágenes de satélite generalmente no muestran nubosidad sobre estos valles, pero sí sobre sus crestas laterales. Nacen allí los ríos Tapias, hacia la parte norte, Ranchería, sobre la dorsal, y Badillo en la parte sur del Núcleo 7. La parte norte de este núcleo está vinculada a un área de relieve particular donde se entrecruzan valles de cuencas de ríos y corrientes, que desembocan en el mar, con los asociados a fallas geológicas y erosión por el viento ENE, como la de San Francisco.

En los tres ríos ocurre un incremento en los caudales para mayo – junio, y luego el máximo anual en octubre – noviembre, siguiendo el patrón bimodal de precipitaciones en el Caribe, con disminución en diciembre-abril y en julio o agosto, concordando con los cambios en la dirección del viento en P-06 (Figura 3-11 y Figura 3-14).

La correspondencia en la fluctuación anual de los caudales de estos ríos, se apoya en la alta y significativa correlación entre ellos ($r = 0.95$ a 0.98) (Tabla 3-7) indicando que este parecido no es por azar, sino que pueden compartir condiciones de origen similares.

Con relación a la dirección del viento en el punto P-06, que está explicando el 79% de la variación anual del río Ranchería, el 69% del río Tapias y hasta el 88% del río Badillo. Aunque faltan datos de precipitaciones para reforzar las asociaciones en el análisis, los resultados hacen suponer la subordinación de las condiciones climáticas en el núcleo 7 a un patrón a mayor escala, donde la circulación del viento juega un papel principal.

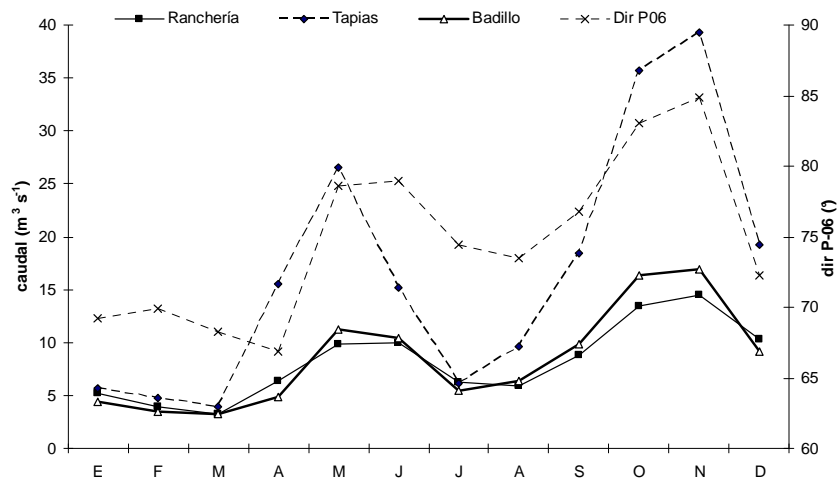


Figura 3-14. Variación anual de los caudales de los ríos Ranchería, Tapias y Badillo, con nacimiento en el núcleo 7 y la dirección del viento en el punto P-06.

3.6.2.6. Núcleo N8. – Cañas.

Este núcleo es prácticamente una extensión norte del núcleo 7, semejante en cuanto a la rugosidad del terreno, surcado por valles que confluyen de diferentes direcciones (N y NE) y con orígenes distintos (valles de cuencas o de fallas). Se encuentra próximo a la esquina NE de la SNSM y no presenta mayores elevaciones, como en los núcleos anteriores (a excepción del N1), siendo inferiores a 2500 m. Los principales ríos con nacimiento allí son el río Cañas y el río Jerez que desembocan al mar en el sector de Dibulla. De éstos sólo contamos con datos de caudales del río Cañas, más bien modestos (Figura 3-15).

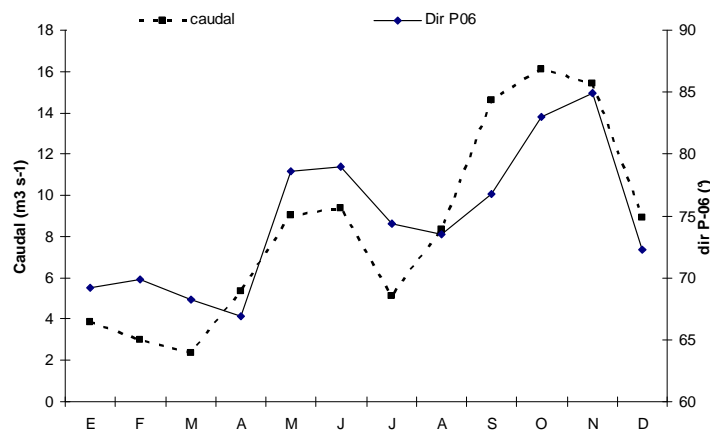


Figura 3-15. Variación anual del caudal del río Cañas en el núcleo 8 y la dirección del viento en el punto P-06.

Tabla 3-7. Matriz de correlaciones en el Núcleo 7, entre los caudales medios de los ríos Ranchería, Tapias y Badillo y con la dirección del viento en P-06.

	<i>Ranchería</i>	<i>Tapias</i>	<i>Badillo</i>	<i>Dir P06</i>
<i>Ranchería</i>	1			
<i>Tapias</i>	0,95	1		
<i>Badillo</i>	0,98	0,96	1	
<i>Dir P06</i>	0,89	0,83	0,94	1
Var. Explicada	0,79	0,69	0,88	

Tampoco se tienen datos confiables sobre precipitaciones en la montaña, como para hacer correlaciones. Asumiendo un patrón anual a mayor escala manifestado en los cambios de dirección del viento, se encontró una correlación alta ($r= 0.87$) y muy significativa ($p < 0.01$) entre éstos y los caudales del río Cañas. De alguna manera esta vinculación incluiría las precipitaciones en las cuencas de los ríos y en sus nacimientos, normalmente asociadas al transporte de humedad por el viento.

Este núcleo presenta como característica particular un origen geológico complejo y heterogéneo con sectores de granulita de los Mangos, roca volcánica, plutones de gabro y sedimentos Cretácicos, al extremo del batolito central (INGEOMINAS Atlas geológico – Mapa SNSM, ver. 2006) y cruzado con gran cantidad de fallas destacando la Falla Ranchería y la Falla Carrizal. Aparentemente, hubo épocas cuando los caudales de las corrientes fueron lo suficientemente activos, como para formar ese sistema de valles en sentido NS y NE. Las corrientes actuales no se consideran con capacidad suficiente como para tal propósito, a menos que ocurrieran cambios climáticos sustanciales, que hagan aumentar los caudales de los ríos y quebradas principales de este núcleo.

La descripción anterior sobre la conformación de 8 núcleos o estrellas hidrográficas sobre la SNSM y su comportamiento anual promedio, muestran un patrón climático de variación estacional coherente con la acción del viento y la distribución de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones en el macizo, determinando el clima, siendo la tendencia general de mayores precipitaciones y nubosidad a mayores altitudes (>1500 m) y menores temperaturas. El lado SE de la SNSM se comporta de modo diferente al los lados N y W del macizo y la geomorfología de esta vertiente responde a unas condiciones particulares que merecen ser analizadas aparte. En todos los casos será de importancia el análisis de la variabilidad interanual afectada por el clima global, para considerar variaciones a mayor escala de tiempo.

3.7. Implicaciones climáticas asociadas a condiciones atmosféricas en el Caribe

Tanto por su localización geográfica, como por su particular geomorfología, con sistemas de fallas que conectan la circulación del viento del lado oeste con el lado norte y viceversa, la Sierra Nevada constituye un sistema geomorfológico condensador, productor de nubosidad y lluvias, relativamente independiente de la presencia de capa vegetal, que tiene un papel regulador, si; pero no generador.

La frecuencia e intensidad de las precipitaciones en la SNSM sigue patrones que han sido antes identificados y en los cuales las condiciones imperante se traducen en aumentos y disminuciones en la producción de agua en el macizo. Sin embargo, las condiciones generales suelen ser perturbadas por el desarrollo de sistemas de baja presión en el Caribe (ciclogénesis), ondas tropicales, depresiones, tormentas, huracanes, que normalmente se presentan de junio a noviembre de cada año y cuya frecuencia puede ser muy variable. Lo que López y Howell (1964) suponían para los vendavales, es extensivo a la dinámica climática de toda la Sierra. Las imágenes de satélite muestran cómo un sistema de baja presión que pase frente a Colombia en el Caribe, promueve el acarreo de masas de humedad considerables desde el interior del continente, de los Llanos, de la Orinoquia, como del Pacífico, que terminan llegando a la SNSM (Figura 3-16). Por la época de su presencia, estos eventos favorecen las precipitaciones en la SNSM y las crecientes súbitas de los ríos, teniendo en cuenta agudas pendientes y la pérdida de capa vegetal reguladora.

Si bien cualquier centro de baja presión (depresiones, tormentas) en el mar Caribe puede tener influencia sobre las condiciones atmosféricas de la Sierra Nevada de Santa Marta, los huracanes son los de mayores dimensiones y efectos, ejemplarizados aquí con el tránsito del huracán Dean frente al área del 17 al 20 de agosto de 2007. La imagen del 17, muestra cómo desde antes de llegar la perturbación se manifiesta con incremento de nubosidad y lluvias gracias al acarreo de humedad desde gran distancia y cómo después de haber pasado, todavía afecta las condiciones locales en SNSM (Figura 3-16).

La mayor frecuencia e intensidad de estos huracanes hace aumentar las precipitaciones en la SNSM, lo mismo que el riesgo de crecientes súbitas, avalanchas y deslizamientos. A su vez, su formación se ve favorecida por las condiciones de los eventos de 'La Niña', pero no con las de 'El Niño', asociadas con mayor vorticidad anticiclónica a altos niveles (200 hPa) y con aumento del cizallamiento vertical entre los 10° - 30°N, desfavorable para las tormentas (Shapiro, 1987).

De no ser por estas perturbaciones, las condiciones típicas de nubosidad en la SNSM para la época lluviosa, son como se presenta en la Figura 3-17. Prácticamente los ocho núcleos de nacimiento de ríos antes descritos, se muestran cubiertos de nubes, lo cual es indicativo de lluvias y de aumento de caudales. Contrasta con la menor nubosidad en el valle Cesar-Ranchería, Guajira, y el sector de Guatapurí. Estos mismos sectores estarían soportando alta insolación y altas temperaturas la mayor parte del día. Las condiciones de 'sombra de lluvia' de la Serranía del Perijá explican la falta de nubosidad en el valle y en sitios sobre la cara SE del macizo.

Las condiciones atmosféricas de diciembre a marzo, cuando prevalece la acción de los vientos alisios, promueven la nubosidad en el macizo al acarrear aire húmedo del mar. Esto explicaría el patrón de precipitaciones anuales en sectores altos de la SNSM y de caudales de ciertos ríos que no muestran reducciones significativas a mediados de año, sino a fin de año.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que a mayor velocidad del viento, las nubes pueden ser desplazadas de los núcleos de precipitación antes descritos, evitando así la producción de lluvias en los meses de diciembre a marzo y aumentando la aridez en el sector sudoriental de la Sierra Nevada. Esta situación particularmente responde por la reducción de los caudales de los ríos Guatapurí, Cesar y Ranchería desde su cuenca alta y debe hacer aumentar la evapotranspiración en las cuencas bajas de estos ríos y sus afluentes menores.

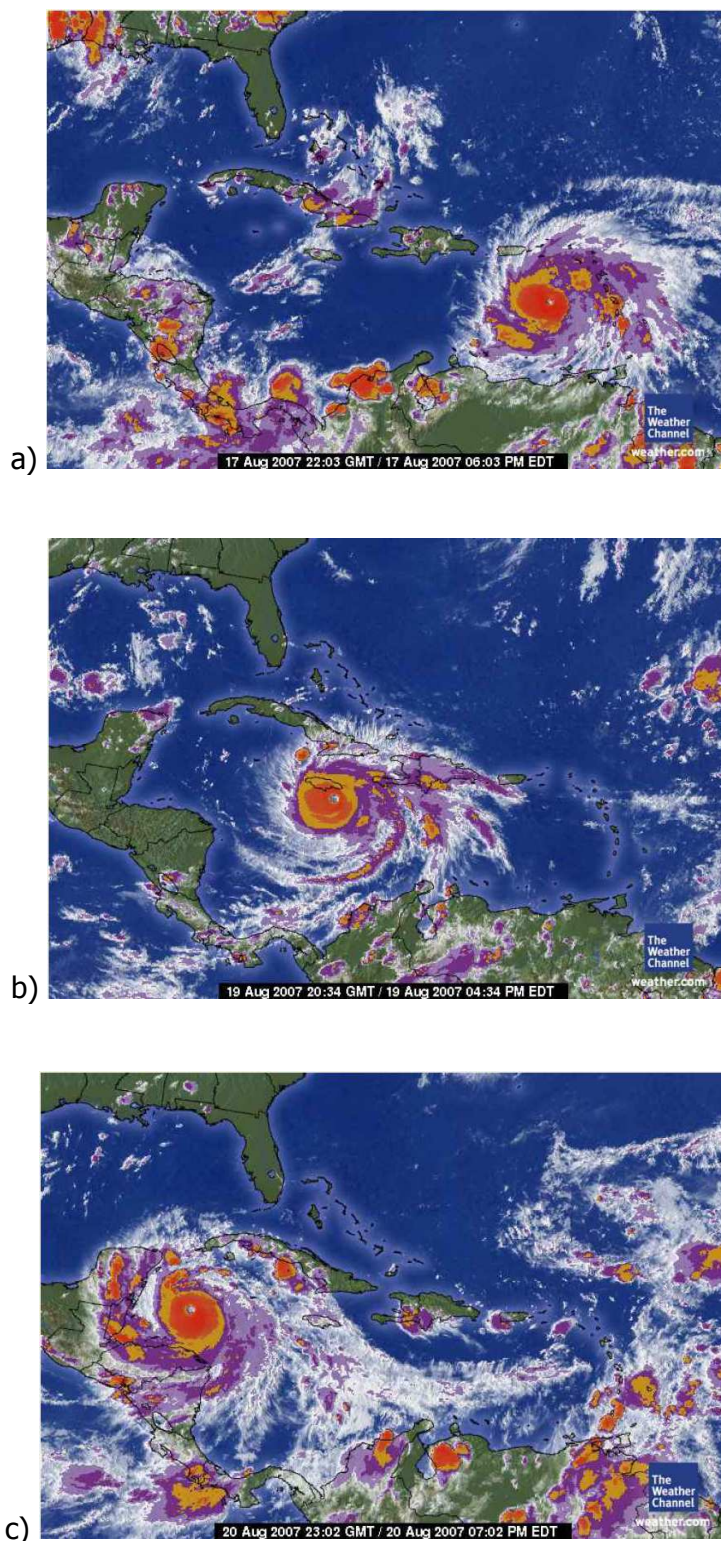


Figura 3-16. a) El paso del huracán Dean con aumento de nubosidad y lluvias por la humedad procedente del sur, inicia las perturbaciones atmosféricas en la SNSM desde antes de llegar frente a ella. El paso del huracán Dean frente a la SNSM (b) y luego de haber pasado (c). Nótese la persistencia de las perturbaciones atmosféricas favorecedoras de lluvias en el macizo.

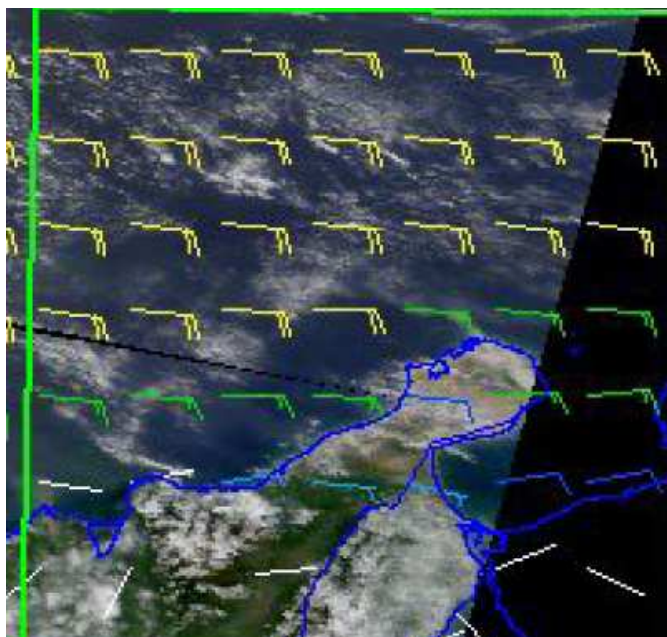


Figura 3-17. Imagen de satélite (Modis_wind_composite) de la distribución de la nubosidad sobre los núcleos de nacimiento de los principales ríos de la SNSM en 28-08-2007. Obsérvese la relativa ausencia de nubes sobre el valle Cesar-Ranchería y en el ángulo nororiental del macizo, causada por el efecto de sombra de lluvias con la retención de humedad del lado venezolano de la Serranía de Perijá. (Fuente: Next-Sat Project, <http://www.nrlmry.navy.mil>). Viento del E con velocidad entre 8 y 12 m s-1

3.8. RELACIONES INFERIDAS ENTRE EL CLIMA Y LA GEOMORFOLOGÍA DE LA SNSM

3.8.1. La Distribución mensual y diaria de nubosidad y lluvias

Los efectos meteorológicos se manifiestan diariamente acentuando la llamada marcha diurna de la nubosidad (Garreaud y Wallace, 1997). Dicha marcha describe un patrón en la frecuencia diurna de nubosidad y lluvia. En general existe mayor nubosidad sobre la SNSM que sobre el mar en todas las épocas, siendo máxima en los meses de junio, julio y agosto. Las horas del día con mayor nubosidad y probabilidad de lluvias convectivas son entre las 21 y 24 GMT (16-19 hora local) en los meses de junio, julio y agosto; siendo mínima en diciembre, enero y febrero. También, aunque en menor grado, tienen lugar precipitaciones entre las 9-12 GMT (4-7 hora local) y también su frecuencia es relativamente mayor en los meses de junio, julio y agosto, que en el resto del año.

3.8.2. Las condiciones geomorfológicas favorables para lluvias en la Sierra Nevada

La presencia de laderas ascendentes en los sistemas montañosos, como la SNSM, facilitan por sí mismas la formación de cúmulos predecesores de lluvias. De acuerdo con Orville (1964), la adición de vapor de agua tiene tres efectos principales sobre el movimiento de las masas de aire:

- La evaporación en las faldas con cobertura vegetal hace que el aire por encima de las laderas sea menos denso que el aire a la misma elevación sobre una llanura. El efecto de flotabilidad resultante es idéntico al debido al calentamiento del aire.
- El viento que asciende por las laderas hace penetrar el aire con alto contenido de vapor de agua, que aumenta más su flotabilidad cuesta arriba.
- La elevación y el enfriamiento del aire húmedo finalmente permite la formación de nubes y la liberación del calor latente (Figura 3-18).

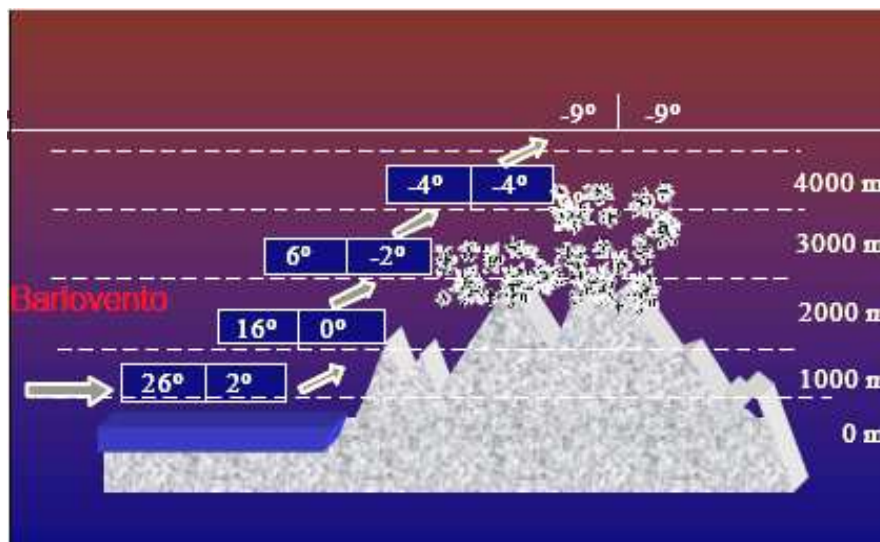


Figura 3-18. Esquema del ascenso del aire húmedo desde el mar hacia la cumbre del sistema montañoso de la Sierra Nevada. Temperaturas del aire y de punto de rocío (PR) en °C.

Durante las horas de insolación, las laderas de toda montaña se calientan más que las masas de aire libre al mismo nivel. Por consiguiente, se produce un centro local de baja presión a lo largo de toda la ladera, de modo que tiende a producirse un viento que sopla desde el fondo del valle, hacia la cumbre. Este efecto se ve acentuado por el hecho de que el fondo del valle es la región que más se calienta durante el día y la masa de aire sobre él tiende a elevarse, de modo que las superficies isobáricas resultan inclinadas hacia la ladera y con ello se produce un reforzamiento del viento ascendente.

De noche ocurre el efecto contrario, de modo que se entabla una corriente de aire descendente que produce abundantes condensaciones de vapor de agua a media y baja altura sobre el suelo.

En un macizo montañoso, como la Sierra Nevada, atravesada en la dirección del viento general, las láminas gaseosas se ven impelidas ladera arriba por la masa de aire en movimiento que las empuja por detrás. A su vez, la masa de aire inmediatamente encima impide una ascensión de tales láminas gaseosas en sentido vertical. Esto puede tener un efecto acelerador sobre ellas al estrecharse la sección por donde circulan.

3.8.3. El viento Föhn, Perijá, y el efecto sombra de lluvias en el valle Cesar-Ranchería.

Recibe este nombre (Föhn o Chinook) un viento en el cual las masas de aire que entran en juego, experimentan una serie de cambios adiabáticos en su ascenso por la vertiente a barlovento de una cordillera elevada y en el descenso por la de sotavento, tales que al alcanzar

en esta última vertiente, una altitud sensiblemente similar a la del origen, el viento, originariamente templado, sopla como viento caliente y seco. Esta resequedad a sotavento es denominada 'sombra de lluvias', causada por el efecto de barrera que tiene la cordillera ante el flujo del viento húmedo (Figura 3-19). La situación se ejemplifica a continuación.



Figura 3-19. El efecto sombra de lluvias esquematizado.

Suponiendo una Serranía de 1000 m de altura, como la de Perijá, y un viento del este que asciende por la ladera venezolana desde el Lago de Maracaibo, con una temperatura de 26° C. Si para este viento se asume una humedad relativa de 80%, entonces se tiene que $H_r = E = 100 * f / F$ (Hernández, 1968), donde F es la humedad absoluta: 23.7 g de vapor de agua por m³ de aire y f es la correspondiente tensión máxima de vapor: 19 g kg⁻¹, o humedad específica del aire.

En estas condiciones, la masa de aire ascenderá en régimen adiabático seco hasta alcanzar el nivel de condensación, es decir, un nivel al que la tensión de vapor (Tensión máxima de vapor o f) tenga el mismo valor que la humedad absoluta del aire (F). Este valor (19 g kg⁻¹) se alcanza a una temperatura de +21.3° C (Tabla 3-8). El enfriamiento adiabático del aire seco tiene lugar a razón de 1° C por cada 102 m ~ 100 m, de modo que el nivel de 21.3° C se alcanzará por el viento ascendente a una altura de $100 * (26 - 21.3) = 470$ m. Asumiendo a nivel del mar un Punto de Rocío (PR) de 4° C, a 470 m el PR será logrado a 3° C y a 1000 m de altitud a 2° C. (Figura 3-18)

O sea, que a 470 m se iniciará el fenómeno de la condensación, con lo cual la ascensión del aire dejará de tener lugar según una adiabática seca para pasar a regirse por el decremento seudoadiabático que asumimos como de 0.5° C por cada 100 m de ascenso hasta la cresta de la serranía. Resta una altura de $1000 - 470 = 530$ m. ($530/100 = 5.3$), en cuyo ascenso el aire húmedo experimentará un enfriamiento de $5.3 * 0.5 = 2.7$ ° C. De modo que la temperatura en la cima será de $21.3 - 2.7 = 18.6$ ° C.

Una vez rebasada la cresta de la Serranía de Perijá, el viento al descender se comprimirá y por consiguiente se calentará, de modo que si aún conserva algo de humedad, el aumento de

temperatura tenderá a evaporarla rápidamente y el descenso se efectúa en régimen adiabático seco, o sea con base en un incremento de 1° C por cada 100 m de descenso. El valle del río Cesar está a una altitud de unos 100 m, o sea que el descenso será de sólo 900 m.

Por lo tanto, el incremento de temperatura al cabo del descenso de 900 m será de 9° C y la temperatura final será de 26+9 = 35° C; es decir 9° C más que la de origen (26° C). Este calentamiento y la resequedad que lo acompaña son característicos del viento Föhn a sotavento y en consecuencia, produce el fenómeno de 'sombra de lluvias' al socaire, a lo largo del valle del Cesar-Ranchería. La precipitación en San Juan del Cesar apenas llega a 876 mm año⁻¹, muy seco, si se considera que está situado a 300 m de altitud.

Tabla 3-8. Humedad referida al aire saturado de humedad SWV (F) y al aire seco (f) o TMV, con la temperatura (T), según los modelos exponenciales calculados

$$F = -1.957 + \text{EXP}(1.922 + 0.052 * T) \quad \text{y} \quad f = -2.418 + \text{EXP}(1.9496 + 0.0524 * T)$$

HUMEDAD Temperatura: °C	ABSOLUTA		ESPECÍFICA	
	(F)	SWV: g m ⁻³	(f)	TMV: g kg ⁻¹
-10		2,1		1,7
0		4,9		4,6
5		6,9		6,7
10		9,5		9,4
11		10,2		10,1
12		10,8		10,8
13		11,5		11,5
14		12,2		12,2
15		13,0		13,0
16		13,7		13,8
17		14,6		14,7
18		15,5		15,6
19		16,4		16,6
20		17,4		17,6
21		18,4		18,7
22		19,5		19,8
23		20,6		21,0
24		21,9		22,3
25		23,1		23,6
26		24,5		25,0
27		25,9		26,5
28		27,4		28,0
29		28,9		29,7
30		30,6		31,4
31		32,3		33,2
32		34,1		35,1

Ahora, asumiendo una temperatura de 35° C y una humedad relativa de 50%, le corresponde una humedad absoluta de 40.2 g.m³ y una humedad específica (f) = 0.5*F; 0.5*40.2 = 20.1 g kg⁻¹. Tal humedad específica se logra a 22° C (Tabla 9); la altura de condensación será entonces: 100*(35-22) = 1300 m. Que representa una altitud 36% mayor que la necesaria para la condensación en Perijá (470 m). De allí hasta 4000 m del lado de Guatapurí, el ascenso sigue pseudoadiabáticamente: 4000-1300m = 2700 m, 2700/100 = 27; 27*0.5 = 13.5° C y la temperatura en la cima será 22-13.5 = 8.5° C en promedio.

Suponiendo nuevamente un Punto de Rocío (PR) de 4° C en el valle del río Cesar, a 1300 m se habrá reducido en 2.6° C, de modo que su valor será de 1.4° C. A 4000 m de altitud, el PR será de -4° C.

La situación real es más compleja y causa perturbaciones en el régimen meteorológico local, con secuelas importantes, como la fusión de las nieves y la aridez a sotavento.

Las condiciones anteriores, distintas de lo observado en los lados norte y oeste de la SNSM, le confieren unas características de aridez relativa, que con el tiempo ha debido afectar el relieve de esta parte de la Sierra, al facilitar la meteorización del terreno y la erosión por las corrientes que han formado sinuosos valles de dirección norte-sur. Sin embargo, el viento también ha influido en la formación de valles, como hacia Pueblo Bello y al sur-occidente de este sitio, con orientación más este-oeste.

La influencia del viento tipo Föhn ha sido también descrita anteriormente por Hermann (1970) para el caso de la región de Santa Marta, luego que el viento procedente del mar supera el cerro de Las Bóvedas en el Parque natural Tayrona, donde deja su humedad y desciende luego seco ('la Brisa') por los valles de los ríos Manzanares y Gaira, explicando la resequedad del sector a sotavento.

Como se observa en la Figura 3-20, los valles resultantes en el sector de Guatapurí-Pueblo Bello, se entrecruzan sin mostrar un patrón definido, distinto al de las corrientes que por ellos fluyen. Las condensaciones y precipitaciones a mayores altitudes (>1500 m) ha originado pérdida de la cobertura vegetal en terrenos más bajos, dejándolos más expuestos al calentamiento solar y a los agentes meteorizantes, dándole esa apariencia fuertemente rocosa, agreste y denudada, que le son características.

Lo anterior hace suponer que la formación o surgimiento ('uplift') de la Serranía de Perijá, marcó un viraje hacia las condiciones climáticas que se prolongan hasta hoy en día. Anterior a tal eventualidad, el clima en todo el sector debió ser considerablemente más húmedo, con mayores precipitaciones a altitudes menores y mayores caudales en los ríos. Todo esto debiera haber favorecido la existencia de grandes bosques en toda la región hace miles de años.

Obviamente, las condiciones a nivel mesoescalar están ligadas a la variabilidad climática, incluido el fenómeno de 'El Niño'. Todo esto se refleja en la variabilidad de los caudales de algunos ríos, que siguen esta señal, como el Aracataca, el Sevilla y el Fundación (Blanco, et.al., 2006). Falta estudiar el comportamiento multianual de los demás ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta. Darían una idea sobre lo que pudo ocurrir durante períodos bastante prolongados, cuando predominaron condiciones 'El Niño' o 'La Niña' generalizadas, al parecer asociadas de alguna manera con los ciclos de Milankovitch (Martínez, et.al., 2003). Autores como Molnar y Cane (2002) indican que eventos así sucedieron en el Plioceno medio.

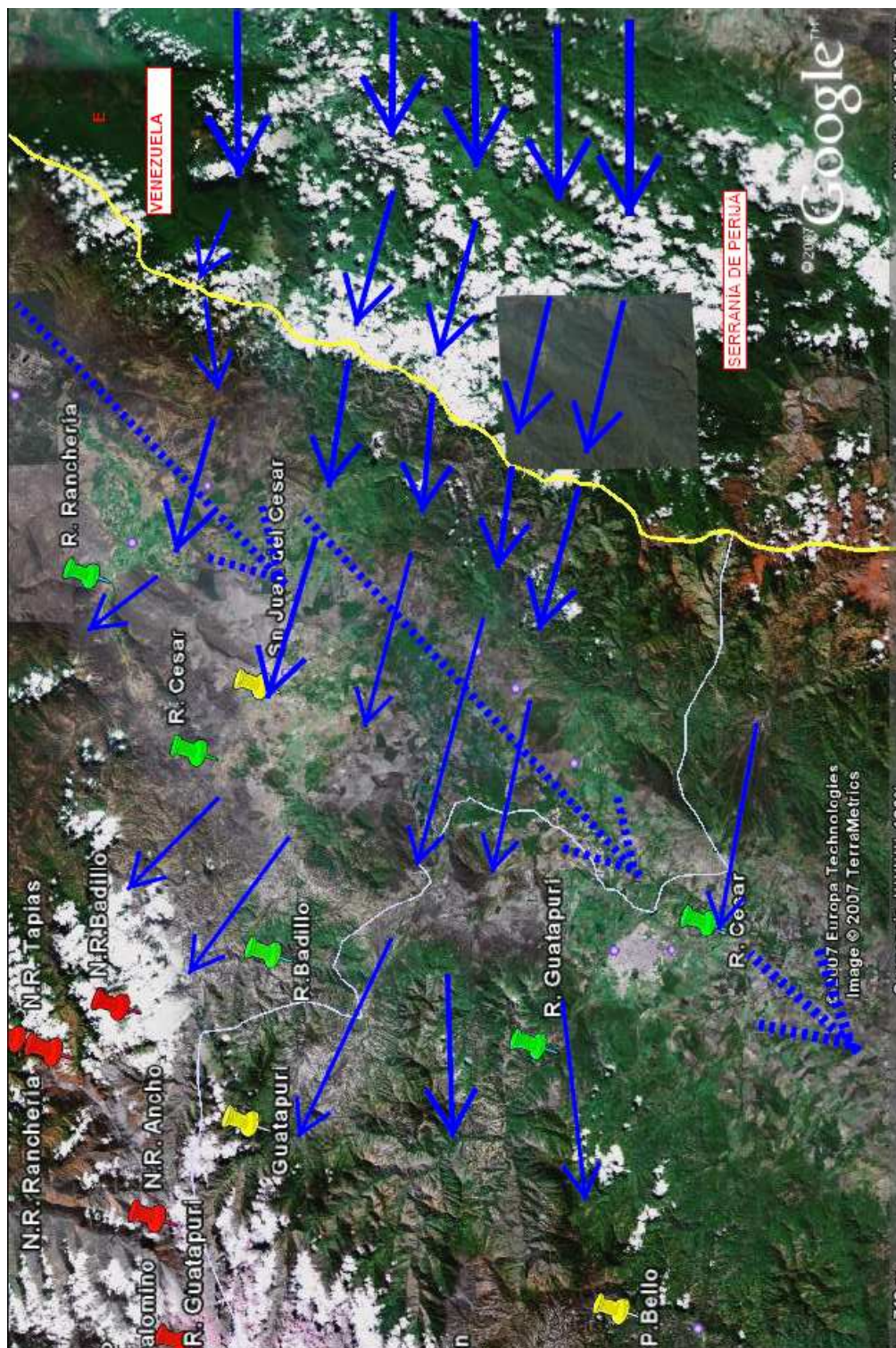


Figura 3-20. Representación de la circulación del viento del este sobre la Serranía de Perijá, que actúa como barrera causa el efecto 'sombra de lluvias'. El viento 'Föhn' que desciende, reseca y calienta el terreno al pasar sobre el valle Cesar-Ranchería. Nótese la retención de nubosidad del lado venezolano de Perijá. En trazos, el viento NE también derivado del este, que fluye a lo largo del valle. Imagen de Google Earth.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se cuenta ahora con una base de datos georeferenciada y cronológica que nos permite contar con una referencia clara acerca del origen y características del viento que llega del mar a la SNSM. Se ha podido determinar que durante todo el año los vientos alisios, con direcciones NE, ENE, E, son los predominantes en la región Caribe y que gran parte de la circulación de los vientos en el macizo es controlada por ellos.

Queda todavía mucho análisis por hacer de esta información contenida en CDs, (INGEOMINAS, ECOPETROL-ICP, INVEMAR, 2008) para tener una idea más completa de la variabilidad, no sólo estacional, sino interanual para la región Caribe y para el sector que nos ocupa, como es el adyacente a la Sierra Nevada de Santa Marta y esto se podría continuar en los próximos meses.

Si bien existe ya la información de referencia base para la acción de los vientos alisios al llegar a la SNSM, del análisis de la información satelital, ésta contrasta con escala y la calidad de información disponible de las estaciones localizadas en el macizo. Todo parece indicar que la circulación por encima del nivel de los alisios (2 km>) es muy diferente a lo que ocurre a menor altitud, pero actualmente no es viable conocer cuanto. Por otra parte, hay que considerar el efecto anemorográfico, cuando el viento se acelera o cambia de dirección debido al relieve por donde circula. Esta condición puede resultar un mosaico complejo, debido a la estructura accidentada del macizo, con profundos valles y grandes elevaciones. Sin embargo, a falta de datos locales, la posibilidad para entender la circulación del viento en la Sierra, estará en aplicar modelos de circulación en condiciones similares, aunque es tecnología a la que habría que tener acceso, quizás mediante convenios o 'joint ventures' con instituciones que la posean, como Colorado o Arizona en USA.

El análisis pluviométrico indica la existencia de patrones de distribución anual de las lluvias, que se asocian con la altitud, siendo mayores las precipitaciones a más elevación. En la generalidad de los casos se aprecia la presencia de dos estaciones o épocas anuales, una de sequía en los tres primeros meses del año y una de lluvias de abril a diciembre, con un mínimo relativo a mitad de año. Este mínimo anual puede faltar en la mayoría de las distribuciones en estaciones de mayor altura (>2000 msnm). Seguramente esta variabilidad en las precipitaciones está asociada con cambios atmosféricos, entre ellos, cambios de presión y circulación del viento. Lo que ocurre por encima de los 2200 msnm es todavía desconocido. Por las razones arriba mencionadas, no es practicable aún la vinculación entre vientos y precipitaciones.

Aunque los datos limnimétricos son de mejor calidad, hay que tener en cuenta que los propósitos para que fueron creadas estas estaciones son para manejo del suministro de agua para acueductos y para distritos de riego, no para investigación. Dado que su uso es mayor en las tierras bajas, allí situaron las estaciones. De modo que hay que distinguir entre la variabilidad en los caudales debido a razones naturales y al uso del agua. También es evidente la presencia de patrones de distribución de épocas de estiaje y de creciente anuales, que en ciertos casos corresponden con los vistos en la distribución de lluvias anuales. Sin embargo, la variabilidad entre los patrones observados permite concluir que para comprenderla es necesario el estudio por cuenca o por conjuntos de cuencas que compartan características comunes, como

altitud, pendiente, lluvias, entre otras. Nuevamente, lo que sucede en las cuencas que nacen en las tierras altas (>2000 msnm) queda incógnito por el momento.

La cuestión clave en este estudio climático de la SNSM, es la calidad y la cantidad de la información disponible para los análisis necesarios para su comprensión. Sin embargo, queda como opción la modelación, aunque ello implica un aporte de tecnología importante.

En términos generales, se puede afirmar que la cara norte es la más húmeda, la oriental la más seca y la occidental muestra una condición intermedia. La planicie caribeña que rodea el macizo presenta un clima cálido y seco.

Al igual que para todo el territorio nacional Caribe, el régimen de lluvias bimodal está definido en gran parte por el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que determina dos máximos lluviosos uno en mayo y otro en septiembre-octubre, separados por un mínimo de lluvias transitorio en julio-agosto y luego una época seca de diciembre a marzo. La variabilidad de estas épocas está influida por factores climáticos globales, como ENSO y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) (Gianini et. al., 2000). Sin embargo, en cada uno de sus tres flancos se presentan particularidades relacionadas con los agentes mencionados anteriormente, que modifican este patrón de lluvias.

De no ser por la SNSM, todo el litoral Caribe colombiano al noreste del Río Magdalena hasta la Guajira sería una llanura muy árida. La vegetación se torna xerofítica a medida que se acerca la línea de costa. Sólo hay áreas de bosque lluvioso al norte y oeste de la SNSM, coincidentes con la mayor precipitación.

El análisis de la información existente sobre la acción del viento y de las consecuentes convergencias y divergencias, como de campos teóricos de presiones atmosféricas generadas, y el análisis de la geometría de este macizo piramidal de base triangular, permiten hacer el análisis conceptual siguiente: Teniendo en cuenta sólo los vientos alisios como acarreadores de humedad desde el mar Caribe hacia la SNSM y que su dirección es NE, las divergencias asociadas a altas presiones quedan a barlovento o sea en su cara norte; mientras que la zona de convergencia del viento, asociada a bajas presiones se ubica a sotavento en la cara SW de la SNSM. La altitud de la SNSM (5800 m) y la altura de la circulación de los alisios (aprox 2000 m) obligan a que la circulación del viento que ingresa se produzca alrededor del macizo, en vez de por encima de éste (López y Howell, 1961).

La consecuencia es que no se produciría el típico efecto 'sombra' pluviométrico (Wilhelmy, 1954), que es lo usual cuando el viento sobrepasa una montaña cuya altitud es inferior o igual a la altura del viento, dejando la humedad a barlovento antes de volver a bajar por sotavento. En este último sector se produce entonces una aridez generalizada (Snow, 1976). En el caso de la SNSM los alisios chocan oblicuamente contra su lado norte, produciendo allí seguramente un aumento en la presión atmosférica; luego ascienden por esta pendiente y parte condensa allí la humedad que trae del mar, rodean a la Sierra, produciendo el viento Föhn seco o 'Chinook' (análogo al efecto sombra) a baja altitud (Herrmann, 1970). Este viento catabático, derivado del alisio, desciende acelerándose (efecto 'Venturi') por los valles, como los de los ríos Manzanares y Gaira, y convergiendo en la cara SW de la misma, donde se ubica la baja presión atmosférica relativa al macizo. No se conoce que ocurra lo mismo en la Guajira, en Cesar o en otros valles o crestas montañosas de la SNSM.

También el viento del NE sufre un torcimiento o deflexión a la altura del Cabo de La Aguja, tomando una dirección N, para dirigirse hacia el lado SW de la SNSM, donde se localiza la baja presión. En su tránsito descendiente el viento seco retoma humedad del territorio costero, del

mar y del sistema lagunar CGSM-CP. El viento, ahora húmedo y cálido, asciende por su falda, hasta alturas donde la humedad precipita, alimentando así las cuencas de los ríos. No es claro todavía si el efecto Föhn es manifiesto a altitudes mayores a 1000 msnm. ó si simplemente viento y humedad rodean las cumbres del macizo, distribuyéndose alrededor de las tierras altas.

La mayor aridez relativa del lado SE de la SNSM, puede bien obedecer a que ese lado tiene una orientación similar a la que trae el viento alisio (aprox 45°), por lo que barre este costado de la Sierra en forma paralela. Parte del viento logra ascender y su humedad precipita a mayor altitud; la mayor parte fluye a lo largo de esa cara de la SN, sustrayéndole humedad y acarreándola al vértice sur del macizo. Sin embargo, es vertiente de dos de los principales ríos de la Sierra, como son el Río Cesar y el Río Ranchería.

A causa del enfriamiento orogénico, la mayor parte de las precipitaciones debe ocurrir entre los 500 y los 900 m de altitud y el desgaste de las rocas es mayormente de tipo químico, por la mayor temperatura y humedad (Tschanz, et al. 1969); sin embargo, estrellas fluviales importantes, como San Lorenzo están situadas a 2600 m de altura. A mayores altitudes de 3000 m, debiera llover mucho menos y el desgaste ocasionado es debido a causas mecánicas, entre ellas el viento y la congelación.

El enfoque asumido en este trabajo es que el clima ha tenido y tiene un papel muy importante en la evolución y conformación geológica de la SNSM. Cada vez se sustentan mejor los argumentos a favor de la influencia del clima y su cambio, en la orogénesis y tectónica de sistemas montañosos del mundo, involucrando procesos de erosión y deposición de sedimentos (Lamb y Davis, 2003). Por ello es necesario asociar la geomorfología del macizo con sus características climáticas, en busca de los factores reguladores de cambios y esto será el tema para el desarrollo de una segunda fase de este estudio.

El análisis de la información de vientos, medida por dispersometría satelital y discriminando por los componentes del viento alisio, logró dar una visión actualizada de la contribución de cada componente, mostrando que la velocidad del viento resultante con efectos sobre el área costera, incluida la SNSM, depende directa y significativamente del viento zonal (U); pero que la dirección del viento resultante depende inversamente de la intensidad del viento meridiano (V). Así, el ángulo de dirección del viento aumenta en los meses en que el viento meridiano disminuye y viceversa.

Se determinó que la dirección de los vientos alisios que llegan del mar desde las altas presiones subtropicales de las Islas Azores, tienen una dirección este predominante, no propiamente del NE como se suponía. La dirección ENE y NE se logra debido a la deflexión que sufre el viento hacia la izquierda, a causa de la fuerza de fricción por la rugosidad del continente y la menor presión atmosférica sobre éste originada por el calentamiento diferencial entre mar y tierra. Estos efectos se acentúan en el litoral y explican los resultados obtenidos en el análisis de las pocas estaciones anemométricas en cercanías de la SNSM.

Por otra parte se pudo establecer que la variación del ángulo de dirección del viento en los puntos P-05, P-06 y P-07 corresponde significativamente con el tránsito latitudinal estimado para la zona de confluencia intertropical (ZCIT) sobre nuestro territorio. Sin embargo, para los análisis se prefirió tomar de referencia las medidas de la dirección del viento, antes que las estimaciones imprecisas de la ZCIT. Esto constituye una utilidad adicional de los datos de dirección del viento y una variación en la metodología tradicional de relación con un patrón de frecuencia anual de las variables.

El análisis de los fenómenos observados (condensación, lluvias) desde el punto de vista de los principios físicos básicos en transporte de fluidos permitió encontrar una explicación coherente para el funcionamiento de la Sierra como un centro productor de agua, determinado por sus propias características geomorfológicas.

El estudio de las imágenes de satélite de la SNSM y áreas aledañas (Landsat, GOES, Modis), apoyadas por los mapas geológicos existentes, permitió determinar las características geomorfológicas principales que influyen en el clima y que a su vez son modificadas por éste. Tales son los valles, tanto los originados por los ríos y procesos de erosión, y los correspondientes a fallas geológicas y sistemas de fallas, de características particulares, como la falla curvada de Orihueca, condicionantes morfológicos que se disponen sobre las tres aristas de la Sierra, formando núcleos fluviogénos en aquellos sitios donde los valles se entrecruzan. Las masas nubosas sobre los ocho núcleos hidrográficos o de nacimiento de ríos, pudieron ser claramente identificados.

Por estas mismas características geomorfológicas, el macizo se comporta como un condensador de humedad que producirá agua en condiciones de época "seca", con la humedad que le llega del mar, y también en la época "lluviosa" cuando la humedad llega desde regiones distantes del continente (Pacífico, Andes, Orinoquia). En ambos casos la vía es atmosférica, de modo que aún desprovista de capa vegetal la SNSM producirá agua, aunque su regulación sería muy difícil de lograr.

La forma en que el viento fluye y la humedad asciende, determinan que la caras norte y occidental de la Sierra sean relativamente más húmedas que la cara SE. Se confirma lo mencionado por López y Howell (1961) en el sentido de que los vientos alisios no pasan por encima de la Sierra, sino alrededor de ella, envolviéndola y circulando por los valles originados en las fallas, que tienen una orientación acorde con la del viento, ENE en su mayoría del lado norte, SW del lado occidental y E y NE del lado SE, frente al valle Cesar - Ranchería.

El aire caliente y húmedo asciende por el plano inclinado de los valles que actúan de conductores y las nubes (cúmulos y cúmulo-nimbus) se forman sobre las crestas laterales de dichos valles. Al ascender el aire pierde calor latente y con las menores temperaturas de las laderas y cumbres la humedad condensa formando nubes. Existe una aparente periodicidad diurna y mensual sobre la frecuencia de nubosidad y de precipitaciones en esta área del Caribe, de manera que tiende a llover más entre las 4 – 7 p.m. y 7 – 9 a.m., principalmente en los meses de junio, julio y agosto.

También se reafirma el supuesto de López y Howell (1961) cuando indican una correspondencia entre el paso de tormentas en el mar Caribe y la frecuencia de vendavales y torrenciales aguaceros en este sector de la costa norte. Las imágenes de satélite permitieron el seguimiento de fenómenos como vaguadas, tormentas tropicales y huracanes y las perturbaciones atmosféricas en la Sierra. Las masas nubosas procedentes de las regiones distantes ya mencionadas son atraídas por la baja presión atmosférica en estos eventos. El seguimiento del huracán 'Dean' en agosto, muestra cómo las perturbaciones se presentan desde antes de que el huracán pase frente a la Sierra, también durante su paso y aún días después de haber pasado. De manera que la vinculación del clima de la Sierra con lo que acontece en el mar Caribe es directa.

De manera que para la comprensión del clima en la SNSM y su variabilidad, es necesario analizar conjuntamente la información climática local, regional y hemisférica, porque a distintas escalas todas forman parte del conjunto de factores determinantes en el clima.

La aridez característica del sector SE de la SNSM tiene también su explicación en la circulación del viento y la geomorfología, en este caso el efecto de barrera que causa la Serranía de Perijá, al atravesarse en el flujo del viento del este, provocando condensación del lado venezolano, pero con un efecto de 'sombra de lluvias' del lado colombiano, con acción de un viento tipo Föhn ('Chinook') que baja de Perijá, se calienta y reseca el valle del los ríos Cesar y Ranchería, esto explica la baja precipitación en San Juan del Cesar, sobre este valle. Al cobrar humedad otra vez, el aire vuelve a subir por las laderas del sector de Guatapurí, donde condensa su humedad al enfriarse por encima de los 1600 m. Se logró un cálculo idealizado que ejemplifica estas condiciones y sus resultados sobre el clima de este sector. Obviamente, las características locales complican más la situación real. Sin embargo, estas deducciones se reafirman en las observaciones de la nubosidad y del viento sobre la SNSM hechas con imágenes de satélite GOES-Modis.

Quedan muchas incógnitas, como por ejemplo ¿cómo era el paleoclima que dio origen a los bosques que hoy son las minas de carbón del Cerrejón, antes de que La Serranía de Perijá entrara en escena?. ¿Hubo un basculamiento asociado al enterramiento de un bosque así, que además cambiara el paleocauce del río Ranchería a su condición actual?

Las situaciones de riesgo son debidas principalmente a las inundaciones súbitas debidas a crecientes de los ríos que tienen cauces a veces muy empinados, lo que acelera la velocidad de sus aguas provocando inundaciones, deslizamientos y avalanchas, favorecidas por la erosión de las laderas. Estos eventos, que pueden ser catastróficos incluso en tierras bajas de municipios como Santa Marta y Ciénaga, generalmente tienden a presentarse en los meses de octubre y noviembre, coincidiendo con los máximos del patrón anual de distribución de precipitaciones y de caudales en los ríos de la Sierra.

Por otra parte, para aproximarse al entendimiento de los cambios históricos en el clima de la SNSM, es preciso analizar la probable vinculación de las condiciones limnimétricas interanuales de sus ríos principales con los agentes de variabilidad climática global más importantes en el Caribe colombiano, el fenómeno de 'El Niño' y la Oscilación del Atlántico Norte (OAN).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Blanco, J.A., Vilorio, E.A. y J.C. Narváez. 2006. ENSO and salinity changes in the Ciénaga Grande de Santa Marta coastal lagoon system, Colombian Caribbean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 66: 157-167.
- CPPS. 2002-2007. Boletines de Alerta Climática. ERFEN. Edición digital web.
- Forsbergh, E.D. 1969. On the climatology, oceanography and fisheries of the Panama Bight. *Interamerican Tropical Tuna Commission* 14 (2): 260 p.
- Garreaud, R. y J.M. Wallace. 1997. The diurnal march of the convective cloudiness over the Americas. *Monthly Weather Review* 125: 3157-3171.
- Giannini, A., Kushnir, Y. & Cane, M.A. 2000 Interannual variability of Caribbean Rainfall, ENSO and the Atlantic Ocean. *Journal of Climate* **13**, 297-311.
- Hermann, R. 1970. Las causas de la sequía climática en la región costanera de Santa Marta, Colombia. *Rev. Acad. Col. Cienc. Exac. Fis. Nat.* 13 (52): 479-489.
- Hernández, S. 1968. *Meteorología y Oceanografía*. Edit. Cadi, Barcelona. 780 p.
- INGEOMINAS, 1969. Mapa geológico de reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta, escala 1:200.000. Ministerio de Minas y Petróleos con la colaboración de U.S. Geological Survey.
- INGEOMINAS, ECOPETROL-ICP, INVEMAR, 2008. Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. Geomorfología de la zona costera y piedemonte occidental. 206 p. 4 Anexos.
- Lamb, S. y P. Davis, 2003. Cenozoic climate change as a possible cause for the rise of the Andes. *Nature*, **425**: 792-797.
- López, M.E. y Howell, W.E. 1961. The campaign against windstorms in the banana plantations near Santa Marta, Colombia, 1975-57. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 42: 265-276.
- Martínez, J., Keigwin, L., Barrows, T.T., Yokohama, Y. y J. Southon. 2003. La Niña-like conditions in the eastern equatorial Pacific and a stronger Chocó-jet in the northern Andes during the last glaciation. *Paleoceanography* **8** (2): 1033
- Molnar, P y Cane, M. 2002. El Niño's tropical climate and teleconnections as a blueprint for pre Ice-Age climates. *Paleoceanography* **17** (2): 11-1/11-11.
- Orville, H.D. 1964. On mountain upslope winds. *Journal of the atmospheric science* 21: 622-633.
- Portig, W. H. 1976. The climate of Central America. In *Schwerdtfeger, W. (Ed.) World Survey of Climatology, Climates of Central and South America*. Elsevier Sci Pub. Co. Amsterdam. Vol.12, 405-487.
- Shapiro, L.J. 1987. Month-to-month variability of the Atlantic tropical circulation and its relationship to tropical storm formation. *Month. Wea. Rev.* 115: 2598-2614.

Snow, J.W. 1976 The Climate of Northern South America. In *Climates of Central and South America. World Survey of Climatology* (Schwerdtfeger, W. ed.), Elsevier Science Publishing Co. NY, 12, 295-381.

Tschanz, CH.M., Jimeno, A. y C. Vesga, 1969. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Area (Colombia). INGEOMINAS, Informe N° 1829. Bogotá: 304 p.

Weather. Com, <http://www.weather.com> consultado en el 2007

Wilhelmy, H. 1954. Die klimatologische und pflanzengeographische Entwicklung des Trockengebietes am Nordrand Südamerikas seit dem Pliozän. *Die Erde*, 6: 244-273.