

Características del ciclo diurno de precipitación en el Caribe de Costa Rica

Fernán Sáenz¹ y Jorge A. Amador^{1,2}

¹ Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica. <Fernan.SaenzSoto@ucr.ac.cr>

² Escuela de Física, Universidad de Costa Rica

(Recibido: 2-Dic-2015. Publicado: 6-Feb-2016)

Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar las características del ciclo diurno de la precipitación en la vertiente Caribe de Costa Rica, su variabilidad espacial y estacional, así como su relación con los patrones de viento. El área de estudio es una vertiente tropical caracterizada por marcados gradientes topográficos y ubicada a barlovento de los alisios procedentes del mar Caribe. Se caracteriza el ciclo diurno medio de la precipitación en la región y su variabilidad mensual. La distribución mensual del viento horario es también analizada y se proponen algunos mecanismos de interacción de los sistemas de viento local con los alisios para explicar los patrones observados en el ciclo diurno de la precipitación. Para realizar este estudio se integró una base de datos con 20 series de tiempo con resolución horaria para la precipitación, obtenidas de 3 fuentes y 6 series de tiempo para el vector viento con la misma resolución. El estudio se complementó con compuestos mensuales de viento sinóptico derivados de ERA-interim. Se observó que el ciclo diurno medio anual de la precipitación tiene una gran variabilidad espacial que podría ser explicada, parcialmente al menos, por la topografía y la cercanía a la costa. A lo largo del año, en las diferentes subregiones que componen el área de estudio, se observaron los cuatro regímenes de variabilidad diurna que han sido reportados en estudios tropicales de carácter global: oceánico (máximos entre las 6 y 9 TSL), continental (máximos entre las 15 y 18 TSL), costero sobre el mar (máximos entre las 3 y 12 TSL) y costero sobre tierra (máximos entre las 18 y 0 TSL). Se propone que la variabilidad de los alisios podría estar relacionada a la variabilidad estacional del ciclo diurno en algunas zonas. Los resultados obtenidos son consistentes en general con los presentados en estudios realizados con estimaciones satelitales de la precipitación pero con algunas diferencias en la fase del ciclo diurno en ciertas regiones como la zona costera.

Palabras clave: Ciclo diurno, precipitación, Caribe de Costa Rica.

Abstract

The aim of this work is to analyze the diurnal cycle of precipitation over the Caribbean slope of Costa Rica, its variability (seasonal and spatial) and relationship with local and regional wind patterns. The study region is a tropical basin featured by marked topographical gradients located windward to the trades. To accomplish this task a database consisting of 20 hourly precipitation time series and 6 hourly wind vector time series was assembled with data provided by 3 different institutions. ERA-interim 925 hPa wind fields monthly composites complemented the analysis. Annual mean diurnal cycle of precipitation featured great spatial variability which could be explained, at least partially, by topography and distance to the shore. All four diurnal precipitation patterns previously reported in a global tropics study appeared as monthly mean diurnal cycles at different locations within the study area: oceanic (peaks between 6 and 9 LST), continental (peaks from 15 to 18 LST), coastal over seas (peaks between 3 and 12 LST) and coastal over land (peaks between 18 and 0 LST). It is proposed that trade winds variability could be linked to seasonal variability of the diurnal cycle of precipitation in some regions. Obtained results are broadly consistent with the ones presented in other studies based on satellite precipitation estimates but with some differences in the diurnal cycle phase over coastal regions.

Key words: Diurnal cycle, precipitation, Caribbean of Costa Rica.

1. Introducción

El ciclo diurno es sin duda uno de los elementos de variabilidad climática más relevantes para determinar los mecanismos dinámicos y termodinámicos dominantes en la formación del clima regional. De acuerdo a Trenberth *et al.* (2003), el conocimiento y entendimiento del ciclo diurno es primordial para determinar las características de la precipitación regional. Las brisas de mar/tierra y valle/montaña, los sistemas convectivos de mesoescala y las tormentas locales son generados por mecanismos que actúan en la escala diurna a pesar de ser modulados por escalas mayores (i.e. interacción de escalas). Por ejemplo, Qian *et al.* (2012) determinaron la influencia de modos intraestacionales e interanuales en el ciclo diurno de la precipitación en la región tropical del continente marítimo.

La vertiente Caribe de Costa Rica es una región cuya actividad productiva dominante es la agricultura. La actividad bananera, que genera un 80% de los empleos directos e indirectos en las zonas de producción, es una de las principales fuentes de empleo en la provincia de Limón. Este sector productivo ha apostado por la eficiencia y la competitividad, por lo que requiere un grado alto de conocimiento del clima local para planificar de forma adecuada sus actividades. Prácticas agrícolas como el riego y la fumigación pueden ser ejecutadas con eficiencia si son programadas tomando en cuenta información sobre el ciclo diurno de la precipitación. Adicionalmente, la disponibilidad del recurso hídrico es afectada por la variabilidad diurna: la evaporación, la escorrentía y el almacenamiento dependen de la hora a la que se dan las mayores precipitaciones. Si la mayor parte del agua precipita durante el día esta tendrá mayor probabilidad de evaporarse y no escurrir o ser almacenada.

El ciclo diurno de las diferentes variables atmosféricas y las características estacionales de esta componente del clima, en función de las condiciones topográficas y los mecanismos físicos presentes en la región han sido temas relativamente poco estudiados en Centroamérica y Costa Rica. Los regímenes diarios de precipitación y viento así como su relación en la ciudad de Limón fueron investigados por Zárate (1981). Este trabajo plantea que un aumento en la frecuencia de vientos del oeste en la zona costera se relaciona con un incremento en las precipitaciones y argumenta que la convergencia entre el flujo del oeste y los alisios es el mecanismo generador. En el trabajo de Chacón y Fernández (1985) se estudia el ciclo diurno de la precipitación en algunas estaciones emplazadas en la zona montañosa de la cuenca del río Reventazón (vertiente Caribe). El estudio nota que para la temporada de diciembre a abril, los máximos de precipitación ocurren generalmente durante la noche y primeras horas de la mañana en las regiones de altitud media (expuestas al flujo medio del noreste), mientras que en la temporada de mayo a noviembre ocurren entre las 12 y 18 horas en tiempo solar local (TSL). En el trabajo de Fernández *et al.* (1996) fue incluido un apartado sobre las variaciones con la altura del ciclo diurno de la precipitación a lo largo de un perfil topográfico desde el Pacífico hasta el Caribe costarricense. Dicho estudio señala dos conclusiones básicas acerca del ciclo diurno en la vertiente Caribe: en las zonas bajas no se presenta un ciclo diurno definido, aunque tiende a llover más en la mañana y en la noche y en altitudes medias o altas el máximo de precipitación se da durante la tarde a lo largo de todo el año, aunque de diciembre a abril también se da al anochecer en las altitudes medias.

Algunos trabajos recientes han estudiado el ciclo diurno de la precipitación en la región a partir de estimaciones satelitales. Biasutti *et al.* (2012) presentan un estudio del ciclo diurno de la precipitación en los trópicos globales con cierto énfasis en Centroamérica donde se reportan máximos en la frecuencia de la precipitación entre las 4 y las 7 TSL para la zona costera al norte de la provincia de Limón, estos máximos se propagan hacia tierra desde el mar. La convergencia de brisas de tierra inducida por la concavidad de la costa es el mecanismo propuesto para explicar dicho máximo. Adicionalmente reportan otro máximo en la frecuencia de precipitación entre las 16 y las 19 TSL, este máximo se da en las zonas alejadas de la costa en la vertiente Caribe y la mayoría de la vertiente Pacífica. Rapp *et al.* (2014) analizan la variabilidad estacional y diurna de las tormentas sobre Costa Rica del producto TRMM PR 3B43 (Huffman *et al.*, 2007). Este trabajo reporta poca variabilidad espacial en la estructura del ciclo diurno de la tasa de precipitación, caracterizado por máximos en las primeras horas de la tarde, las principales diferencias se dan en la amplitud del ciclo.

El entendimiento de las características del ciclo diurno de la precipitación es primordial en la concepción de una visión comprensiva del clima en una región rica en mecanismos físicos sobre los cuales existe un conocimiento incipiente. El objetivo de este trabajo es estudiar las características del ciclo diurno de la precipitación en la vertiente Caribe de Costa Rica, su variabilidad espacial y estacional, así como su relación con los patrones de viento. No se conoce trabajos publicados elaborados a partir de una base de datos con observaciones en superficie apta para analizar variabilidad espacial del ciclo diurno en la vertiente Caribe de Centroamérica.

Este trabajo se divide de la siguiente forma: en la sección 1.1 se describe el área de estudio y sus principales características climáticas, en la sección 2 se muestra la ubicación de las estaciones y la información relevante de los datos empleados, la sección 3.1 muestra el ciclo anual de la precipitación, en la sección 3.2 se detalla la

distribución media horaria de la precipitación, la sección 3.3 presenta la variabilidad estacional del ciclo diario de la precipitación y la sección 3.4 presenta el mismo análisis pero para el vector viento, en la sección 4 se discute los resultados y en la sección 5 se presentan las conclusiones del estudio.

1.1. Área de estudio y elementos del clima regional

Costa Rica está ubicada en la región tropical de América, rodeada por el Océano Pacífico al oeste y el mar Caribe al este. Debido a su reducida extensión en sentido longitudinal la presencia de ambos océanos es determinante en la constitución de las características climáticas del país. El área de estudio corresponde a la vertiente Caribe de Costa Rica, principalmente sus zonas bajas (figura 1). Análisis geográficos y de clasificación climática del territorio costarricense han dividido el área de estudio en al menos dos regiones: Norte y Atlántica (Solano y Villalobos, 1999). Cada una de estas regiones está caracterizada por un ciclo anual de la precipitación que difiere en ciertos elementos fundamentales del propio de la otra región, sin embargo, dentro de cada región también existe variabilidad espacial.

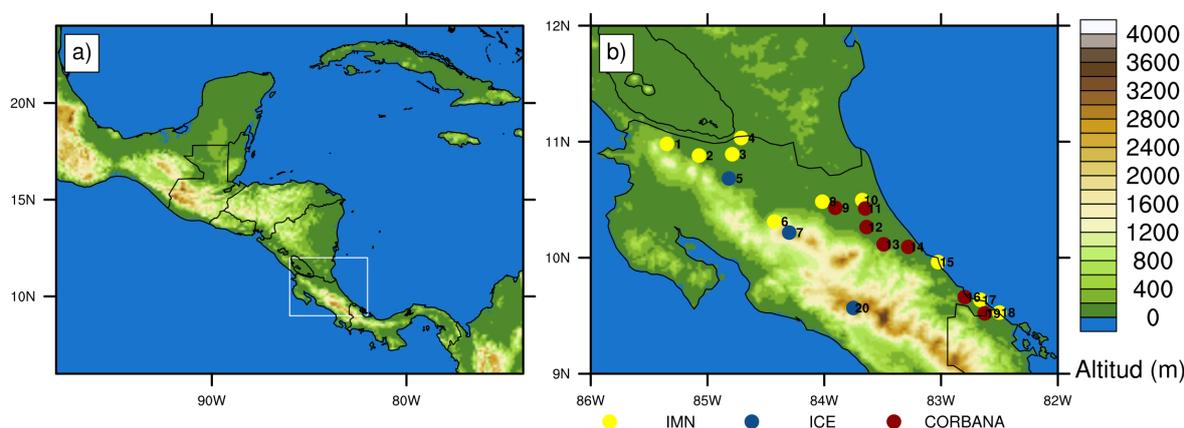


Figura 1: a) Ubicación del área de estudio. b) Altimetría y distribución espacial de las estaciones meteorológicas según administrador.

Dada su ubicación, el clima regional es modulado mayoritariamente por dos elementos de escala planetaria: los alisios y la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La respectiva intensidad de la circulación asociada a estos elementos, así como su interacción, regulan la cantidad de humedad disponible para ser distribuida regionalmente por los sistemas de circulación locales.

La principal característica de los alisios sobre el mar Caribe es la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CCBNC; Amador, 1998 y 2008). Este flujo presenta su máximo cerca del nivel de 925 hPa, su eje se ubica cerca de 15 norte entre 75 y 80 oeste. Esta corriente es caracterizada por su variabilidad temporal, el ciclo anual de la intensidad presenta dos máximos: uno absoluto durante julio y uno relativo durante el invierno boreal (Amador *et al.*, 2003 y 2006). De acuerdo a Amador (2008) las variaciones estacionales en la CCBNC están relacionadas a la respuesta de los alisios a los forzamientos térmicos estacionales modulados por distribución de las masas continentales y oceánicas, coherentemente Cook y Vizy (2010) relacionaron la variabilidad estacional de la CCBNC con las variaciones del gradiente meridional de la altura geopotencial. El ciclo anual de la CCBNC ha sido relacionado con la distribución anual de la precipitación en México y Centroamérica (Magaña *et al.*, 1999), además su intensificación durante el verano boreal se ha vinculado con una disminución en las precipitaciones en la vertiente pacífica de esta región y un aumento en las precipitaciones en algunas zonas de la vertiente Caribe. La altura del máximo de velocidad en la CCBNC y su profundidad también presentan variaciones anuales: durante el máximo absoluto (julio) la CCBNC es más profunda y su punto de máxima intensidad se centra cerca de 925 hPa, durante el máximo relativo (febrero) el máximo de velocidad se centra a la misma altura pero con menor profundidad y durante el mínimo anual (octubre) el máximo de velocidad se ubica cerca de 800 hPa (Cook y Vizy, 2010). Las variaciones en la intensidad de la CCBNC también se dan en escala diaria: los mínimos se dan a las 4 TSL y 16 TSL mientras que los máximos a las 7 TSL y 22 TSL (Cook y Vizy, 2010). En la figura 2 se presenta el campo de viento medio mensual a 925 hPa derivado de ERA-interim (Dee *et al.*, 2011) para el periodo 2006-2011, en esta figura se puede apreciar el comportamiento anual de la CCBNC mencionado anteriormente.

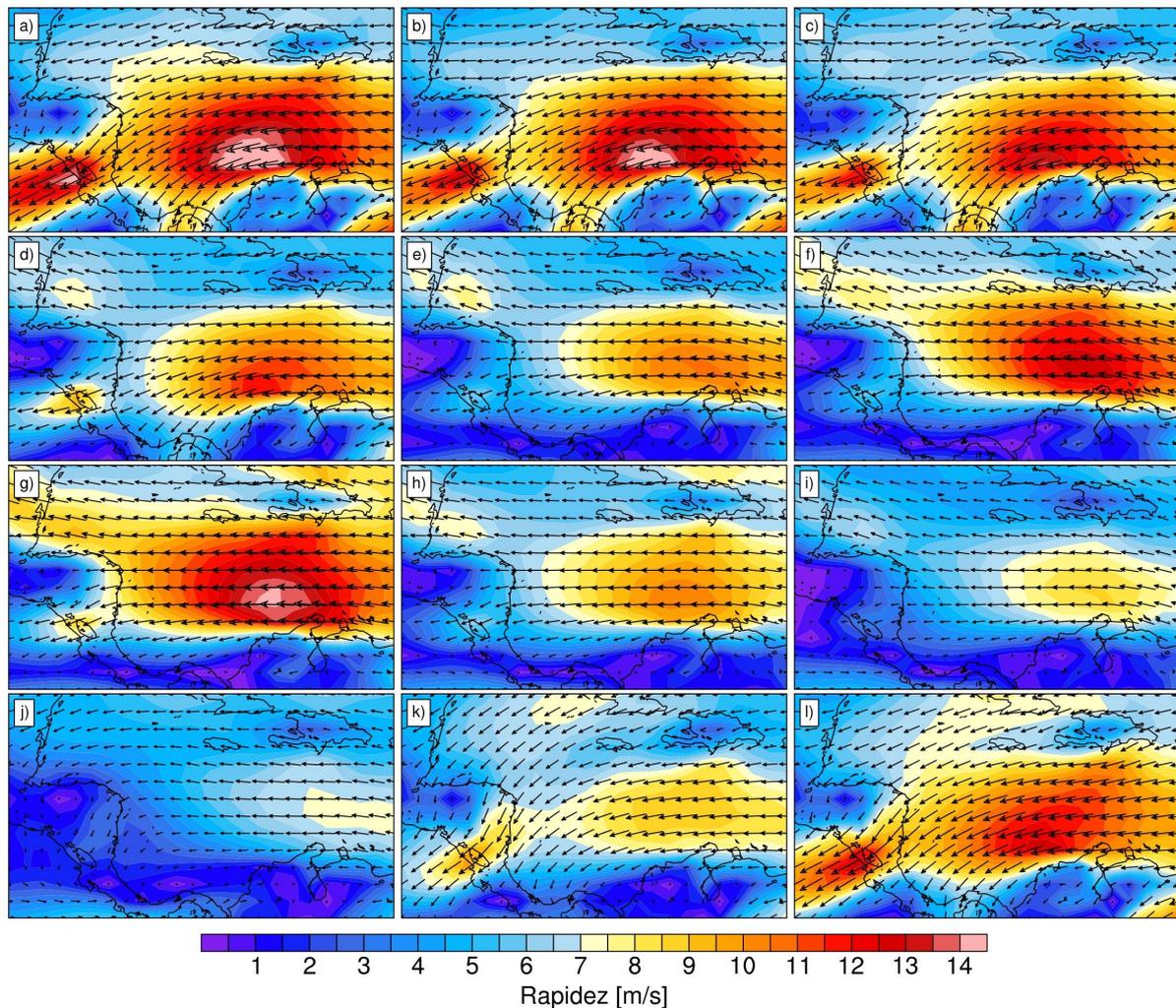


Figura 2: Viento mensual medio a 925 hPa. a) Enero b) Febrero c) Marzo d) Abril e) Mayo f) Junio g) Julio h) Agosto i) Setiembre j) Octubre k) Noviembre l) Diciembre. Fuente: ERA-interim (2006-2011)

La ZCIT y su migración juegan un papel determinante en la organización de la convección sobre los océanos tropicales y sistemas asociados a la ZCIT frecuentemente inducen precipitaciones sobre Costa Rica. La variabilidad espacial en la temperatura superficial del mar y en el viento superficial son las principales fuentes de variabilidad en la ZCIT. De acuerdo a Srinivasan y Smith (1996), en los océanos Pacífico tropical este y Atlántico la migración meridional es gobernada por el mecanismo de retroalimentación entre el viento y la evaporación propuesto por Emanuel (1993), esto cuando la convergencia es inducida por ondas mixtas (Rossby y gravedad).

2. Datos y método

Para este trabajo se recopiló un grupo de series de tiempo producto de observaciones con estaciones automáticas emplazadas en la región de estudio. Estas series fueron obtenidas de tres fuentes: Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Corporación Bananera Nacional (Corbana). Estaciones de todas las fuentes fueron tomadas en cuenta para conformar la base de datos de precipitación mientras que para la base de datos de viento solamente se tomó en cuenta estaciones del IMN. En total se analizaron 20 series de precipitación y 6 de viento, en ambos casos la resolución temporal es horaria y se cubre el periodo 2006-2011. Exceptuando 4 estaciones en el caso de la precipitación (Finca Brasilia, Ciudad Quesada, Bajos del Toro y Cerro de la Muerte) y una en el caso del viento (Ciudad Quesada), las estaciones están emplazadas en zonas bajas, con altitudes menores a 100 metros sobre el nivel del mar. En la figura 1 se detalla la ubicación así como la fuente de cada una de las estaciones cuyos datos fueron usados en este trabajo y en el Cuadro 1 se presenta la información respectiva de cada una de las estaciones empleadas.

Número	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Porcentaje de datos ausentes (Precipitación)	Porcentaje de datos ausentes (viento)	Porcentaje de días con precipitación (%)
1	Finca Brasilia	10.9813	-85.3472	350	4.3	ND	63.35
2	Upala	10.8808	-85.0725	60	5.2	11.6	56.458
3	Caño Negro	10.8919	-84.7881	30	4.2	4.4	51.073
4	Los Chiles	11.0317	-84.7117	40	17.9	22.2	52.716
5	Guatuso	10.6833	-84.8167	50	4.3	ND	58.832
6	Ciudad Quesada	10.3114	-84.4286	700	20	15.4	57.919
7	Bajos del Toro	10.2167	-84.30	1540	8	ND	66.089
8	La Rebusca	10.4833	-84.0167	40	7.6	ND	58.147
9	Pénjamo	10.4308	-83.9062	67	0.03	ND	58.466
10	Cantagallo	10.4967	-83.6744	40	22.3	ND	56.732
11	Las Valquírias	10.4246	-83.6497	39	0.18	ND	57.234
12	Cartagena	10.2644	-83.6375	54	4.1	ND	51.346
13	Siquirres	10.1155	-83.4912	49	1.7	ND	51.94
14	LimoFrut B	10.0935	-83.2804	14	1.4	ND	49.429
15	Limón	9.9622	-83.0247	7	1.7	1.7	49.521
16	Agrotubérculos	9.6604	-82.797	16	2.0	ND	48.288
17	Manzanillo	9.6372	-82.6625	80	14.3	12.7	49.795
18	Sixaola	9.5275	-83.6339	10	14.1	13.1	49.429
19	PAIS	9.5204	-82.6265	17	0.1	ND	46.006
20	Cerro de la Muerte	9.5667	-83.75	3475	1.6	ND	52.031

Cuadro 1: Información relevante de las estaciones automáticas usadas en este trabajo. ND: No hay datos.

Para atacar el problema de los datos ausentes en las series de precipitación se usó el método de rellenado mediante análisis de componentes principales descrito por Alfaro y Soley (2009). Este método usa información de estaciones cercanas, sujetas a mecanismos físicos similares y la identificación de esta cercanía queda a criterio del investigador. En el trabajo aquí descrito las estaciones fueron agrupadas por cercanía geográfica y correlación de la precipitación horaria. Las series de viento no fueron rellenas debido a la ausencia de estaciones cercanas.

Para determinar la variabilidad en la escala temporal más amplia que los datos disponibles permiten se calculó el ciclo anual de la precipitación. Para analizar la variabilidad en escala diurna se calculó la distribución media horaria de cada serie, esto se hizo tomando la media de la precipitación a cada hora del día sobre todos los días en los que se registró al menos 1 mm de precipitación en dicha estación, este cálculo se repitió para cada mes con el fin de ver las variaciones estacionales del ciclo diurno. Se seleccionó el umbral de 1 mm por día para eliminar el ruido producido por los días sin precipitación, usualmente se define como día con lluvia aquel en el que la precipitación acumulada es mayor que 0.2 mm (ver http://glossary.ametsoc.org/wiki/Rain_day). El umbral empleado en este trabajo ha sido usado con éxito para estudiar el ciclo diurno de algunas variables atmosféricas en los trópicos (por ejemplo: Betts, 1998). Para complementar esta parte del análisis se calculó el porcentaje de días con lluvia en cada estación (Cuadro 1).

Para representar las circulaciones locales se calculó la distribución horaria-mensual del vector viento promediando independientemente las componentes zonal y meridional.

3. Resultados

3.1. Distribución mensual de la precipitación

En la Región Norte la temporada lluviosa generalmente transcurre entre mayo y noviembre, no obstante existe una marcada diferencia en el ciclo anual entre las zonas bajas y las altas. En las zonas bajas los máximos de precipitación se dan durante junio, julio, agosto y octubre, con una disminución durante setiembre (figura 3a); en las zonas altas los máximos absolutos se dan en noviembre (figura 3b), usualmente es en este mes cuando se da el ingreso de los primeros frentes fríos a Centroamérica (Schultz *et al.*, 1998) y su interacción con la orografía produce precipitaciones en las zonas de altitud elevada y media. Según Rapp *et al.* (2014) durante noviembre el contenido de humedad en la circulación asociada a frentes es mayor que en los meses del invierno boreal, esto debido a temperaturas relativamente altas en la superficie del mar Caribe. En la región Atlántica no existe una

temporada seca definida, el ciclo anual presenta dos temporadas más lluviosas: de noviembre a febrero y de junio a agosto. El ciclo anual presenta poca variabilidad en cuanto a su comportamiento estacional, sin embargo, existe una marcada variabilidad espacial en los acumulados dado que la zona Atlántica norte (figura 3c) es significativamente más lluviosa que la zona Atlántica sur (figura 3d).

La estacionalidad en los acumulados mensuales de precipitación puede indicar la existencia de una diversidad de mecanismos generadores de precipitación activos en la zona y hace necesario analizar la estructura anual de las variaciones diurnas de la precipitación y no solamente la distribución media horaria.

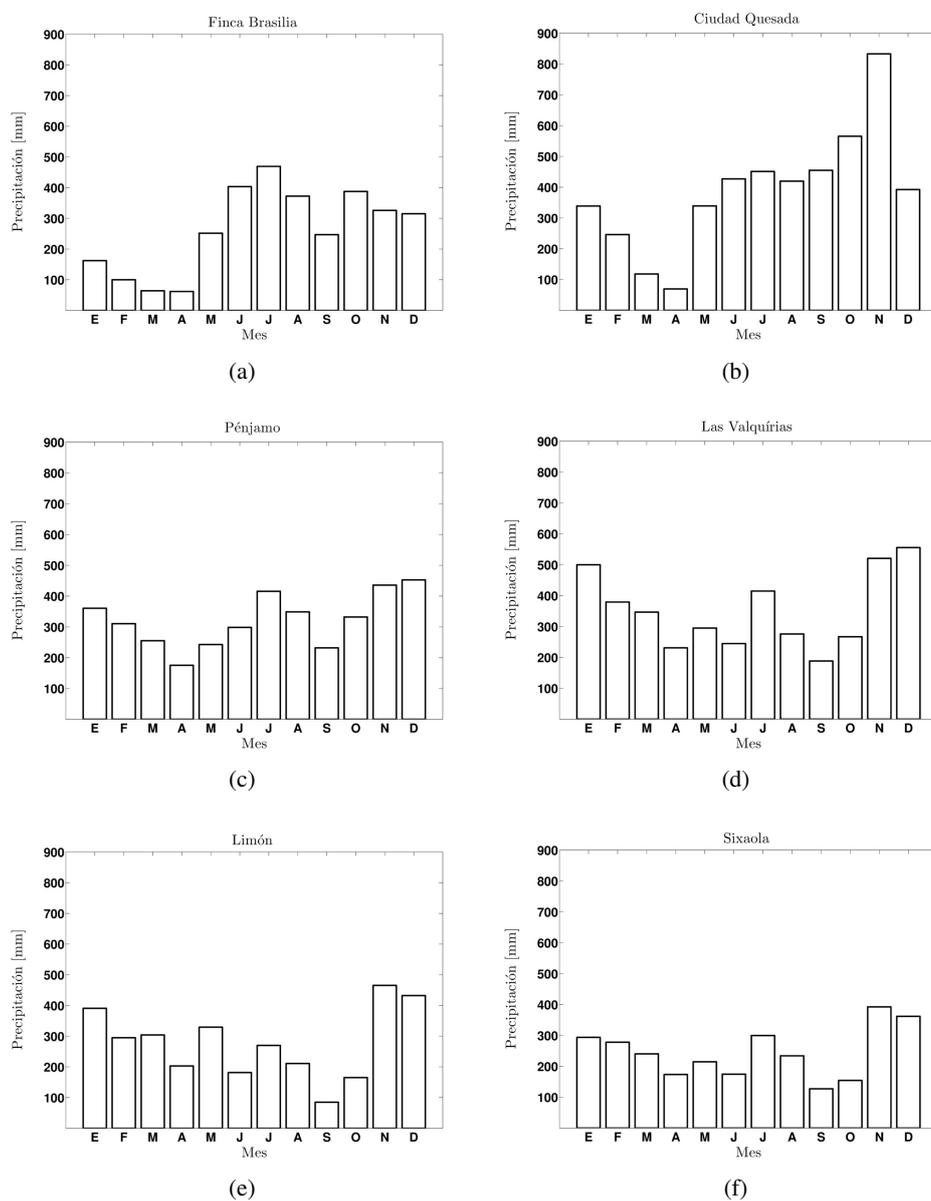


Figura 3: Distribución media mensual de la precipitación.

3.2. Distribución media horaria de precipitación

Las estaciones Finca Brasilia, Upala y Los Chiles, ubicadas en el sector oeste de la Región Norte, presentan máximos de precipitación en la primeras horas de la tarde, específicamente entre las 13-15 TSL (figuras 4a, 4b y 4d). Caño Negro y Guatuso, ubicadas en las mismas zonas, presenta los máximos cerca de las 16 TSL (figuras 4c y 4e). Las estaciones localizadas en las zonas de altura media al sur de la Región Norte, Ciudad Quesada y Bajos del Toro, presentan máximos de precipitación cerca de las 15 TSL aunque con acumulados mayores a las otras estaciones de la Región Norte (figuras 4f y 4g). Cerca del límite con la Región Atlántica se ubican las estaciones

La Rebusca y Pénjamo, éstas se caracterizan por un ciclo diurno con máximos cercanos a las 16 TSL (figuras 4h y 4i). El ciclo diurno en las subregiones de la Región Norte, con datos disponibles, tiene un comportamiento similar al continental descrito por Kikuchi y Wang (2008). Las zonas más altas presentan mayores acumulados de precipitación, más allá del forzamiento convectivo por el calentamiento radiativo, la presencia de la cordillera juega un doble papel: produce forzamiento mecánico de la convección y un forzamiento termodinámico al producir gradientes horizontales de temperatura entre las pendientes y la atmósfera circundante. Adicionalmente, cuando las zonas estratificadas en los sistemas convectivos de mesoescala interactúan con los sistemas montañosos se producen ascensos de masa en los sistemas y se intensifican las precipitaciones en las zonas de interacción (Houze, 2012).

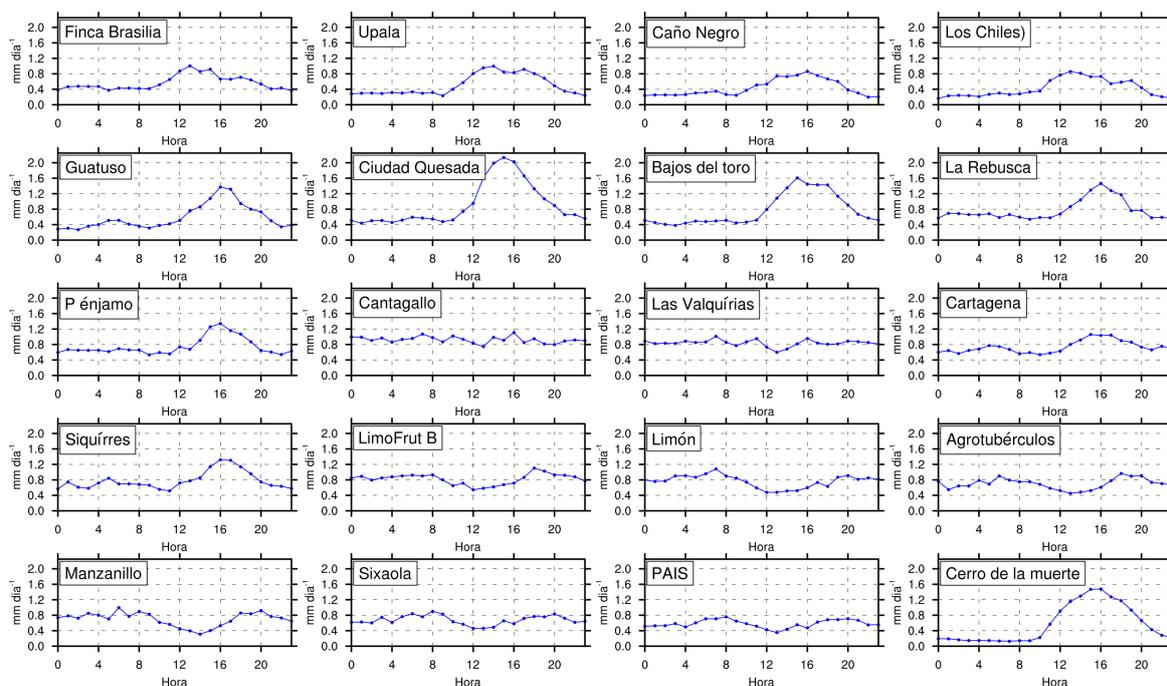


Figura 4: Distribución horaria de la precipitación. El orden de los paneles es coherente con el Cuadro 1

Las estaciones Cantagallo y Valquirias presentan una distribución horaria de precipitación con 3 máximos, cerca de las 7, las 11 y las 16 TSL (figura 4j y 4k). La característica más notoria es un mínimo muy marcado cerca de las 13 TSL, estas estaciones están ubicadas cercanas a la costa, al norte de la Región Atlántica. Este tipo de comportamiento es difícil de caracterizar según lo propuesto por Kikuchi y Wang (2008), pues a pesar que los valores máximos son muy similares, probablemente estén involucrados diferentes mecanismos estacionales. Estas estaciones se encuentran en la zona más lluviosa de Costa Rica según los estimados de precipitación presentados por Rapp *et al.* (2014).

La distribución horaria de precipitación en las estaciones Cartagena y Siquirres, ubicadas en zonas bajas cercanas a las montañas de la Región Atlántica, muestran 2 máximos: el principal entre las 16 y las 17 TSL, y el secundario cerca de las 5 TSL (figura 4l y 4m). Este tipo de ciclo diurno podría catalogarse como continental aunque muestra cierta influencia marítima reflejada en el máximo matutino.

En la Región Atlántica las estaciones más cercanas a la costa: LimoFrut B, Limón, Agrotubérculos, Manzanillo, Sixaola y PAIS presentan dos máximos de similar magnitud: uno entre las 7 y 9 TSL, y otro entre las 19 y 21 TSL (figura 4n, 4o, 4p y 4q). En algunas estaciones el pico de lluvia en la mañana es mayor en otras se da el caso opuesto. El máximo matutino es típico de un ciclo diurno oceánico mientras que el vespertino de un ciclo diurno costero continental. En este caso, al igual que en el resto de regiones, es necesario analizar la variabilidad mensual del ciclo diurno para lograr una mejor caracterización. Los mecanismos responsables del comportamiento del ciclo diurno también pueden ser variables a lo largo del año.

En resumen, se observa que la distribución horaria de la precipitación anual varía en su estructura de acuerdo a la cercanía a la costa. Las estaciones alejadas de la costa presentan máximos durante las tardes, la hora y la amplitud del máximo depende de la topografía local, altitud y cercanía a las montañas. Las estaciones ubicadas en la zona

costera presentan una distribución diaria de precipitación caracterizada por dos máximos al parecer independientes, uno después de la salida del sol y otro en las primeras horas de la noche. Las estaciones costeras ubicadas al norte del área de estudio no presentan una estructura clara, está es la región más lluviosa del sector analizado y está entre las más lluviosas del país. La ausencia de una estructura clara sugiere que en esta región varios mecanismos productores de precipitación pueden estar superpuestos a lo largo del año, por ejemplo frentes de brisa y sistemas de mesoscala con origen oceánico.

3.3. Distribución estacional del ciclo diurno de la precipitación

Las estaciones ubicadas en las zonas bajas de la Región Norte (Finca Brasilia, Upala, Caño Negro, Los Chiles y Guatuso) presentan una distribución horaria de precipitación con poca variabilidad temporal durante su estación lluviosa (mayo a noviembre). Esta distribución está dominada por precipitación en horas de la tarde, con máximos entre las 12 y las 20 TSL. En la zona más cercana al sistema montañoso se observa más precipitación en horas de la mañana durante julio y de noviembre a enero.

En las zonas altas de la Región Norte (Ciudad Quesada y Bajos del Toro) se mantiene la distribución poco variable desde mayo hasta octubre pero los máximos se dan cerca de las 15 TSL. Al ser zonas de altura intermedia (altitudes entre 700 y 1600 msnm) la convección en estas subregiones inicia más temprano que en las subregiones bajas y planas debido al gradiente térmico horizontal que se establece con la atmósfera circundante. Durante los meses del invierno boreal la mayor cantidad de precipitación se da en las mañanas y en las noches, después de las 18 TSL. En el mes de noviembre, cuando se dan los máximos acumulados y se mide precipitación en más del 80 % de los días, se observan características representativas de ambos regímenes diurnos.

En La Rebusca y Pénjamo no se registra una señal diurna clara durante los meses del invierno boreal, cuando se dan los máximos de precipitación. Desde mayo hasta noviembre se observa un patrón con un ciclo diurno marcado en el que los máximos se dan cerca de las 16 TS. Este patrón muestra dos particularidades: Durante julio hay máximos locales cerca de las 8 TSL y las 0 TSL, y durante setiembre y octubre las precipitaciones son casi nulas antes de las 13 TSL. Las estaciones ubicadas hacia el sureste de estas (Cartagena y Siquirres) presentan un comportamiento similar pero con acumulados menores.

En la Región Atlántica norte se puede observar el máximo en julio cerca de las 7 TSL, este máximo cambia su carácter de absoluto a local de noviembre a febrero, meses en los cuales se da otro máximo cerca de las 22 TSL. El efecto de la convergencia entre brisas de tierra y montaña con el flujo de gran escala podría explicar el máximo nocturno. En esta zona también se observa la disminución de las precipitaciones antes de las 13 TSL durante setiembre y octubre.

Las estaciones restantes de la Región Atlántica, todas ubicadas en zonas costeras, presentan un patrón persistente a lo largo del año en el cual la mayoría de la precipitación se acumula durante las noches y las mañanas, esto debido a que existe un mínimo de precipitación entre las 11 y las 17 TSL. A pesar de esto, el máximo cerca de las 7 TSL durante el mes de julio y la precipitación casi nula antes de las 13 TSL durante octubre, también están presentes en la distribución horaria mensual de precipitación en estas estaciones. Al ser esta una zona costera con un sistema montañoso adyacente pronunciado, la propagación hacia la costa de sistemas formados en tierra podría explicar los máximos nocturnos. Los máximos matutinos pueden deberse al efecto de sistemas de mesoescala formados sobre el océano cerca de la costa, se ha reportado la presencia de estos sistemas en las primeras horas de la mañana durante el mes de julio (Mohr y Zipser, 1996). La concavidad de la costa, desde el norte de Nicaragua hasta la zona del Canal de Panamá, podría también inducir convergencia de brisas de tierra en esta zona (Biasutti *et al.*, 2012).

3.4. Distribución mensual del viento horario

En las distintas regiones del área de estudio prevalecen varios regímenes de viento, en algunas zonas los patrones parecen obedecer a sistemas de viento de escala sinóptica o planetaria mientras que en otras zonas reflejan circulaciones locales y/o su interacción con sistemas de mayor escala.

En las zonas planas de la Región Norte, donde se ubican las estaciones Upala y Los Chiles, el viento proviene del este con poca variabilidad en su dirección (figuras 6a y 6b). El ciclo anual de la rápidez presenta máximos entre diciembre y marzo, meses en los que la influencia de los alisios es máxima en la zona (figura 2). Los máximos del ciclo diurno tienen una leve variación estacional relacionada a la variabilidad pluvial en la zona ya que, de diciembre a abril (estación seca) se dan cerca de las 15 TSL mientras que de mayo a noviembre (estación lluviosa) se dan cerca de las 12 TSL. Durante la estación seca los alisios son intensos en esta zona y el calentamiento diurno produce una capa límite bien mezclada que permite el acople de la capa superficial con niveles elevados donde los

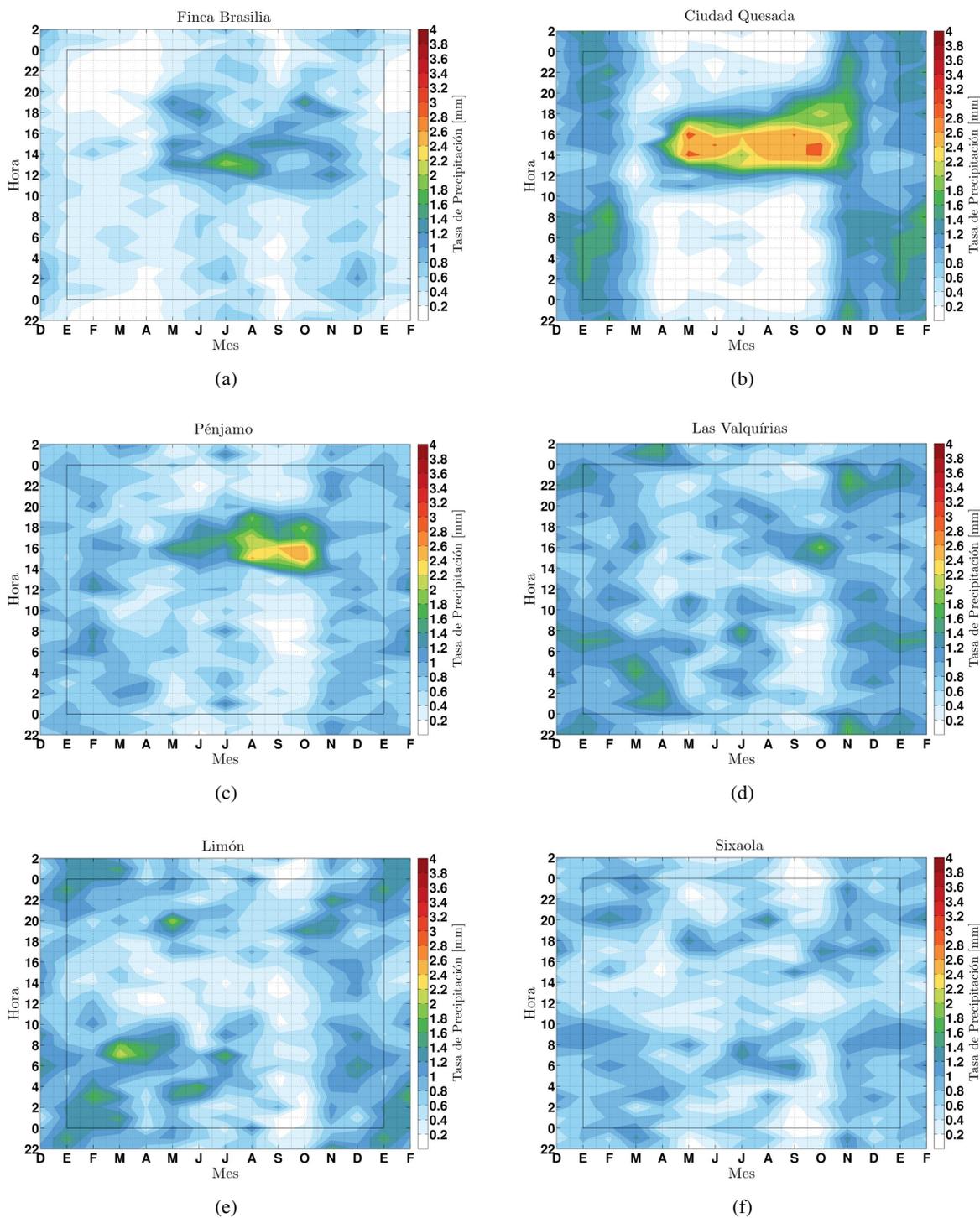


Figura 5: Distribución media mensual de la precipitación horaria. Elaborado con datos correspondientes a días con precipitación acumulada mayor que 1 mm.

alisios son más intensos (p.e. 925 hPa). Los máximos diurnos se dan cuando el calentamiento es máximo. Durante la estación lluviosa los alisios son débiles ($\sim 5 \text{ m s}^{-1}$) y el mecanismo de acople solamente es efectivo durante las mañanas antes de las primeras precipitaciones, las cuáles cambian el régimen dominante en la capa límite.

En las zonas altas de la Región Norte la distribución de la rapidez tiene una estructura muy similar a la de las zonas bajas, sin embargo la dirección si presenta variabilidad diurna, posiblemente modulada por la interacción del flujo de gran escala con sistemas locales de circulación forzados por la compleja topografía de la zona (figura 6c).

En la estación ubicada en ciudad de Limón, a pocos metros de la playa, tanto la rapidez como la dirección del viento tienen una variabilidad diurna marcada: los máximos de rapidez se observan cerca de las 13 TSL en fase con el ciclo de calentamiento, con respecto a la dirección, esta es del este-noreste durante el día mientras que durante la noche el viento proviene del oeste. A lo largo del año existe cierta variabilidad en la dirección del viento en el día: durante julio y octubre el viento proviene mayoritariamente del norte mientras que durante noviembre y diciembre del oeste-noroeste (figura 6d). Los resultados obtenidos para esta estación son coherentes con los reportados por otros trabajos realizados con datos observados durante otros periodos de tiempo: usando datos de 1970 hasta 1978, Zárate (1981) mostró que la presencia de vientos provenientes del oeste durante las noches es constante a lo largo del año. Vargas *et al.* (2011), con datos de 1997 hasta 2007, presenta una distribución horario mensual del vector viento similar a la presentada en este estudio, en ella se observa de nuevo la presencia de viento del oeste en las noches. Otra característica a destacar de la distribución mostrada por Vargas *et al.* (2011) es que en los meses de noviembre y diciembre la dirección es del oeste durante el día y la noche.

En la zona al sur de la Región Atlántica donde se ubican las estaciones Manzanillo y Sixaola, al pie de la cordillera de Talamanca, durante el día se presenta una brisa débil del este-noreste y en la noches los vientos son calmos; en los meses de noviembre y diciembre la dirección del viento durante el día cambia a noroeste (figuras 6e y 6f). Como se observa en la figura 2 en esta zona la influencia de los alisios es menor que en regiones más al norte, aquí la cordillera de Talamanca actúa como una barrera que canaliza el flujo hacia el norte.

La predominancia de los vientos superficiales provenientes del oeste durante los meses más lluviosos en la región costera (noviembre y diciembre) es coherente con el trabajo de Zárate (1981) mencionado anteriormente, dicho trabajo propone tres mecanismos para explicar el cambio en la dirección del viento: a) brisa de tierra, b) establecimiento de un rotor en el campo de viento al rededor de un eje imaginario paralelo al eje montañoso producto de un bloqueo al flujo sinóptico por parte de la topografía y c) presencia de disturbios sinópticos en el mar Caribe (depresiones, tormentas tropicales, etc.). El primer mecanismo es efectivo durante las noches, el segundo está ligado a un aumento en la estabilidad y disminución de la temperatura del flujo sinóptico y el tercero ocurre durante la temporada de ciclones tropicales en el Atlántico. El tercer mecanismo de Zárate (1981) no influye los patrones medios mostrados en la figura 6d.

4. Discusión

Los diferentes análisis realizados muestran que el ciclo diurno es variable en la vertiente Caribe de Costa Rica y que en las diferentes estaciones meteorológicas analizadas el ciclo diurno varía a lo largo del año. Las principales fuentes de esta variabilidad espacial son la interacción de sistemas de diferentes escalas con la topografía y la cercanía a la costa, pues estas no solo producen sistemas de viento local sino que también modifican la forma en que las circulaciones de mayor escala afectan cada zona.

En la Región Norte, los vientos alisios pueden penetrar varios kilómetros sin encontrar obstáculos topográficos importantes. En esta zona el calentamiento diurno produce una capa límite bien mezclada, con poca variación vertical de la componente horizontal del viento, debido al transporte negativo vertical de momento. Lo anterior permite observar los vientos alisios por medio de sensores en superficie. Al encontrar un sistema montañoso con pasos topográficos gran parte del flujo es canalizado, sin embargo, una porción de la humedad que por este es transportada contribuye con la convección a barlovento producto de la inestabilidad generada por el calentamiento radiativo y/o el forzamiento orográfico. Esta zona presenta un ciclo diurno definido con máximos de precipitación en las tardes. Durante los meses del invierno boreal, cuando los alisios son más intensos en la región (figura 2) y se dan empujes fríos desde latitudes medias (Schultz *et al.*, 1998), en las zonas altas se registran máximos de precipitación entre las 4 y las 8 TSL.

Las estaciones ubicadas en la zona de transición entre la Región Norte y la Atlántica, así como en las zonas relativamente lejanas a la costa en la última región presentan variabilidad diurna caracterizada por dos máximos, uno cerca de las 4 TSL y otro aproximadamente a las 16 TSL. Este comportamiento es congruente con régimen costero marítimo reportado por Kikuchi y Wang (2008) con máximos entre las 03 y 12 TSL. Para explicar esta

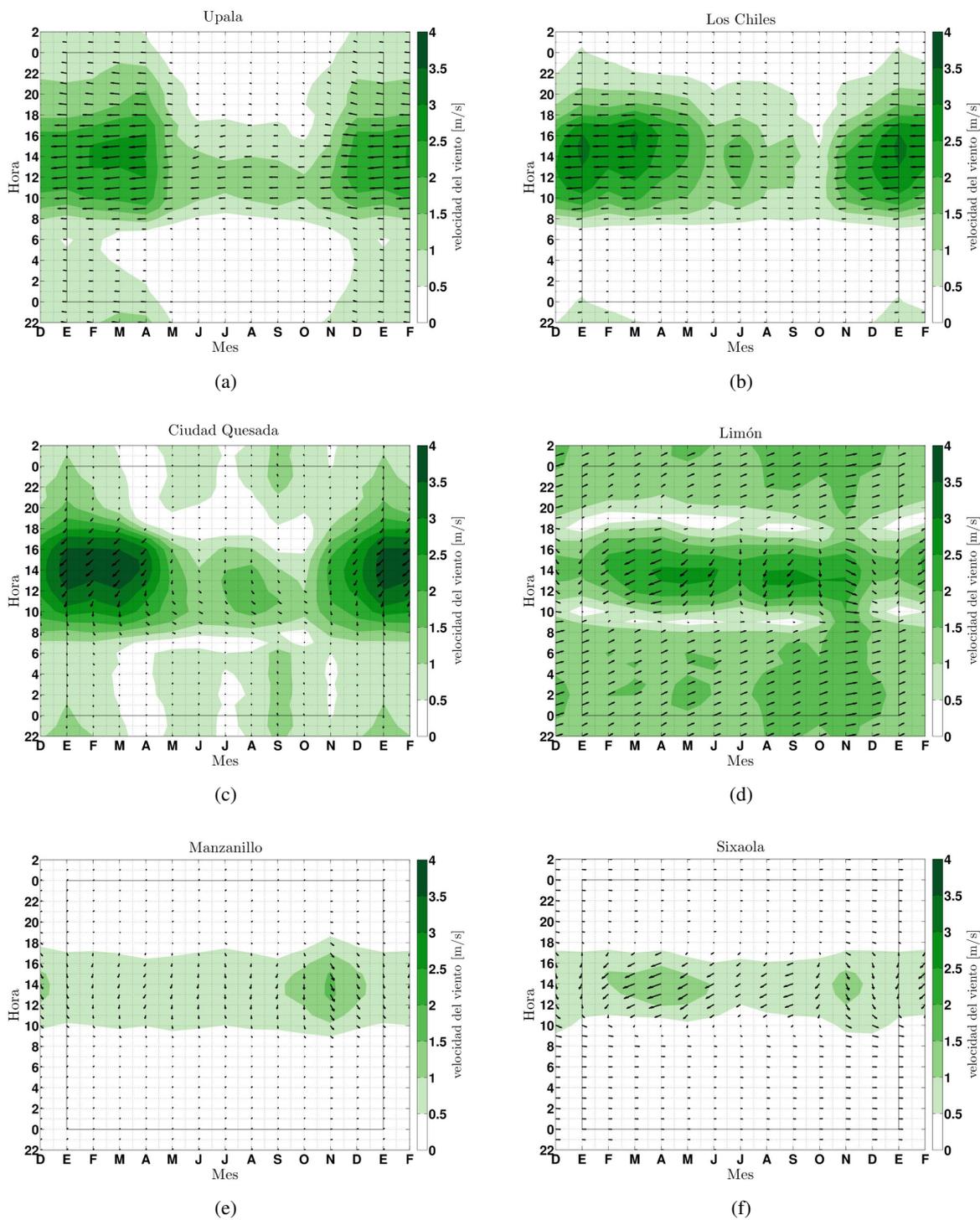


Figura 6: Distribución media mensual del vector viento.

característica de la variabilidad diurna se propone que la convergencia de la brisa de tierra con los alisios podría generar la propagación, desde el interior hacia la costa, de un frente brisa. Este mecanismo ha sido sugerido como explicación para un máximo similar reportado en Oahu, Hawaii (Hartley y Chen, 2010); otra posible explicación a este comportamiento es la advección hacia la zona continental de sistemas de mesoescala formados sobre el océano, cuyos máximos de precipitación se presentan cerca de estas horas (Kikuchi y Wang, 2008), por parte de los alisios que tienen un gradiente marcado sur-norte (figura 2).

En la zona costera al centro y sur de la Región Atlántica la variabilidad diurna es caracterizada por dos máximos que se dan cerca de las 7 TSL y las 19 TSL. El máximo de las 7 TSL puede ser explicado por los mismos mecanismos propuestos para el máximo de las 4 TSL en la relativamente alejadas de la costa en la misma región, el máximo de las 19 TSL puede deberse a la propagación de tierra a la costa de los sistemas causantes de precipitación y es congruente con el régimen costero continental descrito por Kikuchi y Wang (2008).

El sistema de vientos alisios es el principal mecanismo de transporte de humedad a la región (Duran *et al.*, 2010), por lo que su variabilidad mensual y estacional debe verse reflejada en la variabilidad de la precipitación. En la figura 2 se observa que la velocidad y dirección de los alisios presentan un ciclo anual. De diciembre a marzo este flujo proviene del noreste sobre el océano y es canalizado a través de la Región Norte donde toma dirección este. La canalización del flujo y la reducción en su velocidad por la presencia del istmo produce convergencia y precipitaciones significativas en la región Atlántica. La relación entre el viento y la precipitación en la vertiente Caribe de Costa Rica ya ha sido estudiada en otros trabajos (Zárate, 1981; Chacón y Fernández, 1985; Muñoz *et al.*, 2002).

Se resalta la importancia de los alisios en los procesos relacionados a la precipitación en los meses de setiembre y octubre como un caso de interés. Las figuras 2i y 2j muestran que en estos meses los alisios presentan un mínimo y que debido a su poca energía estos son obligados por el sistema montañoso, al sur de la región, a tomar una dirección hacia el sur en la zona costera. Este cambio en la dirección se observa también en superficie (figuras 6d, 6e y 6f). La altura del máximo del CCBNC durante estos meses (800 hPa) también podría influir en los patrones de precipitación observados. La distribución horaria de precipitación en la Región Atlántica (figura 5) muestra que durante estos meses las precipitaciones se dan después de las 14 TSL y antes de esta hora son casi nulas. Este patrón pluvial sugiere que las precipitaciones son causadas por la convección producto del calentamiento diurno.

El ejemplo de los meses de setiembre y octubre muestra que los alisios y su interacción con las circulaciones locales, tienen gran influencia en los procesos que producen precipitaciones en la Región Atlántica, la disminución de la intensidad de los alisios modifica considerablemente el régimen de precipitaciones en esta región. Esta modulación de la precipitación por parte de los alisios ha sido reportada en Dominica donde la precipitación no tiene un ciclo diurno marcado en días con alisios intensos y es producto de la elevación mecánica del flujo por el sistema montañoso (Kirshbaum y Smith, 2009).

5. Conclusiones

El área de estudio está caracterizada por una marcada variabilidad espacial en el ciclo anual. En la Región Norte las diferencias entre los ciclo anuales de la diferentes estaciones se dan en la extensión de la estación lluviosa: en las zonas bajas se extiende hasta noviembre mientras que en las altas hasta diciembre, se propone la interacción entre la orografía y la circulación asociada a frentes fríos como mecanismo responsable de esta diferencia. En la Región Atlántica el ciclo anual presenta una estructura similar, carente de una estación seca, en todas las subregiones; las principales diferencias se dan en los acumulados de precipitación que son mayores en las zonas al norte de dicha región.

La distribución diaria de precipitación no es espacialmente uniforme en la vertiente Caribe de Costa Rica. En la Región Norte domina el ciclo de 24 horas, con máximos durante las tardes. En zonas relativamente lejanas a las costas de la Región Atlántica la precipitación tiene dos máximos, uno relativo cerca de las 4 TSL y otro absoluto cerca de las 16 TSL. En las zonas costeras la precipitación tiene dos máximos con magnitudes similares, uno cerca de las 7 TSL y otro cerca de las 19 TSL. Estos máximos son consistentes con los reportados por Kikuchi y Wang (2008) en un estudio que cubre los trópicos globales. No es un detalle despreciable que en una región con tan poca extensión territorial se observen los cuatro regímenes de variabilidad diurna encontrados en un estudio de carácter global; oceánico (máximos entre las 6 y 9 TSL), continental (máximos entre las 15 y 18 TSL), costero sobre el mar (máximos entre las 3 y 12 TSL) y costero sobre tierra (máximos entre las 18 y 0 TSL)(Kikuchi y Wang 2008).

La interacción física y dinámica de los vientos alisios con la topografía y otros sistemas de viento local determina la distribución diaria de la precipitación. El gradiente sur-norte en el campo de velocidad de los alisios produce

un gradiente con las misma orientación en el campo de precipitación de la Región Atlántica. Cuando los alisios disminuyen su intensidad, los patrones de precipitación cambian en esta región.

En general las características del ciclo diurno en ambas regiones muestran diferencias. En la Región Norte las diferencias entre las subregiones se dan principalmente en la cantidad de precipitación pero no en la estructura del ciclo diurno que es consistente con el ciclo diurno de la temperatura. En la Región Atlántica también se da esta diferencia en los acumulados pero las estaciones lejanas a la costa de la muestran ciclos diurnos con estructuras diferentes a las ubicadas en zonas costeras. Este comportamiento muestra que la cercanía de la costa y los fenómenos dinámicos que esta modula son de vital importancia para el ciclo diurno de la precipitación.

La ubicación geográfica y los rasgos topográficos de Costa Rica la hacen una zona ideal para estudiar las interacciones entre el flujo de gran escala, la topografía y las circulaciones locales. Para comprender esta interacción es necesario contar con una mejor base de observaciones, no solo con una red más densa sino más variada, con observaciones en perfiles verticales y sensores que permitan observar los campos de precipitación y analizar mejor su naturaleza. Experimentos de modelado podrían ayudar a esclarecer la naturaleza de la interacción de escalas presente en el área de estudio de este trabajo.

6. Agradecimientos

Los autores desean extender su agradecimiento hacia los proyectos IAI-CRN2-050, UCR-VI-805-B0-065, A8-606, B0-130, A9-224, A7-002, B0-402, B3-600, B4-227, B5-296 y 808-A9-180. Se agradece a CORBANA por el financiamiento y acceso a sus datos, así como al ICE y al IMN por facilitar algunas series de datos usadas en la elaboración de este trabajo. Este trabajo es derivado de la tesis de licenciatura de Fernán Sáenz quien desea agradecer al Decanato de Ciencias y a la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica, en especial a Dr. Jorge Amador, Dr. Eric Alfaro, Dr. Hugo Hidalgo y Dra. Ana María Durán-Quesada tutor y lectores de dicha tesis. También a Pablo Ureña y a Dr. Javier Soley q.e.p.d por su colaboración en el procesamiento de algunos datos empleados en este trabajo.

7. Bibliografía

- Alfaro EJ, Soley FJ (2009): Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*, 19:59-74.
- Amador JA (1998): A climatic feature of tropical americas. the trade wind easterly jet. *Top. Meteor. Oceanogr*, 5:91-102.
- Amador JA (2008): The intra-americas sea low-level jet. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146:153-188.
- Amador JA, Alfaro EJ, Lizano OG, Magaña V (2006): Atmospheric forcing of the eastern tropical pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69:101-142.
- Amador JA, Chacón RE, Laporte S (2003): Climate and climate variability in the arenal river basin of costa rica. *Climate and Water*, H. Diaz, and B. Morehouse, Eds., Advances in Global Change Research, Vol. 16, Springer Netherlands, pp. 317-349.
- Betts A (1998): Surface diurnal cycle over venezuela. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 67:213-216.
- Biasutti M, Yuter S, Burleyson C, Sobel A (2012): Very high resolution rainfall patterns measured by trmm precipitation radar: seasonal and diurnal cycles. *Clim Dyn*, 39:239-258.
- Chacón RE, Fernández W (1985): Temporal and spatial rainfall variability in the mountainous region of the reventazón river basin, costa rica. *J. Climatol*, 5:175-188.
- Cook KH, Vizy EK (2010): Hydrodynamics of the caribbean low-level jet and its relationship to precipitation. *Journal of Climate*, 23:1477-1494.
- Dee DP and coauthors (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137:553-597.
- Durán-Quesada AM, Gimeno L, Amador JA, Nieto R (2010): Moisture sources for central america: Identification of moisture sources using a lagrangian analysis technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, DOI: 10.1029/2009JD012455, d05103.

- Emanuel K (1993): The effect of convective response time on wische modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50:1763-1776.
- Fernández W, Chacón RE, Melgarejo JW (1996): On the rainfall distribution with altitude over costa rica. *Revista Geofísica*, 44:57-72.
- Hartley TM, Chen YL (2010): Characteristics of summer trade wind rainfall over oahu. *Weather and Forecasting*, 25:1797-1815.
- Houze RA (2012): Orographic effects on precipitating clouds. *Rev. Geophys.*, 50, DOI: 10.1029/2011RG000365.
- Huffman GJ and coauthors (2007): The trmm multisatellite precipitation analysis (tmpa): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorol*, 8:38-55.
- Kikuchi K, Wang B (2008): Diurnal precipitation regimes in the global tropics. *J. Climate*, 21:2680-2696.
- Kirshbaum DJ, Smith RB (2009): Orographic precipitation in the tropics: Large-eddy simulations and theory. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66:2559-2578.
- Magaña V, Amador JA, Medina S (1999): The midsummer drought over mexico and central america. *J. Climate*, 12:1577-1588.
- Mohr KI, Zipser EJ (1996): Mesoscale convective systems defined by their 85-ghz ice scattering signature: Size and intensity comparison over tropical oceans and continents. *Mon. Wea. Rev.*, 124:2417-2437.
- Muñoz AC, Fernández W, Gutiérrez JA, Zárate E (2002): Variación estacional del viento en costa rica y su relación con los regímenes de lluvia. *Top. Meteor. Oceanogr*, 9:1-13.
- Qian JH, Robertson AW, Moron V (2012): Diurnal cycle in different weather regimes and rainfall variability over borneo associated with enso. *J. Climate*, 26:1772-1790.
- Rapp AD, Peterson AG, Frauenfeld OW, Quiring SM, Roark EB (2014): Climatology of storm characteristics in Costa Rica using the TRMM precipitation radar. *J. Hydrometeo*, 15:2615-2633.
- Schultz DM, Bracken WE, Bosart LF (1998): Planetary and synoptic scale signatures associated with Central American cold surges. *Monthly Weather Review*, 126:5-27.
- Solano J, Villalobos R (1999): Regiones y subregiones climáticas de costa rica. Tech. rep., Gestión de Desarrollo. Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica.
- Srinivasan J, Smith GL (1996): Meridional migration of tropical convergence zones. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 35:1189-1202.
- Trenberth KE, Dai A, Rasmussen RM, Parsons DB (2003): The changing character of precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84:1205-1217.
- Vargas J, Alfaro EJ, Gómez J (2011): Tres colón en cariy (1502): reflexiones sobre marinos, el mar y la flora. *Revista Reflexiones*, 90:105-120.
- Zárate E (1981): Regímenes de lluvia y vientos en limón, costa rica. Tech. rep., Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, San José, Costa Rica.