

## Dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense según el sistema de Thornthwaite

Paula M. Pérez-Briceño<sup>1</sup>, Jorge A. Amador Astúa<sup>1,2</sup> y Eric J. Alfaro<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica

<sup>2</sup> Escuela de Física, Universidad de Costa Rica

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica  
<paula.perez@ucr.ac.cr>, <jorge.amador@ucr.ac.cr>, <erick.alfaro@ucr.ac.cr>

(Recibido: 17-Jun-2016. Publicado: 13-Ene-2017)

### Resumen

Una alta variabilidad espacio-temporal en la temperatura y la precipitación son características del territorio costarricense, con una diferencia climática fuerte entre las dos vertientes, la Pacífica y el Caribe. La primera por estar a sotavento de la cadena central de montañas posee un régimen de menor humedad atmosférica mientras que la ladera a barlovento, recibe los vientos alisios cargados de humedad que determinan el clima de la vertiente Caribe, donde llueve prácticamente todo el año. Se analizaron las variables meteorológicas: lluvia y temperatura superficial del aire, integrándolas al relieve en busca de patrones climáticos para asociar las estaciones meteorológicas a un grupo climático determinado. Se utilizaron 82 estaciones meteorológicas con registros de diez años o más. Este trabajo tiene como objetivo elaborar dos propuestas de clasificación climática basadas en el balance hídrico de acuerdo al método de Thornthwaite. La evapotranspiración potencial (ETP) se estimó de acuerdo a Thornthwaite y Hargreaves. A pesar de la diferencia en los resultados de la evapotranspiración potencial debido a la forma en que se estima en cada uno de los métodos, se encuentra que la región varía entre subhúmeda, húmeda y excesivamente húmeda.

**Palabras clave:** Caribe, clima, clasificación, evapotranspiración potencial, Costa Rica, América Central.

### Abstract

*Large space-time thermal and rainfall variability are characteristics of Costa Rican territory, with a strong climatic difference between the two regions, the Pacific and the Caribbean. The former is leeward of the central mountain chain and has a regime of less atmospheric moisture, while the windward slope receives the moisture-laden trade winds that determine the climate of the Caribbean slope where it rains most of the year. Topography and meteorological variables, as precipitation and air surface temperature, were analyzed for climate patterns to associate stations to define the climate groups. A number of 82 meteorological stations with records of ten years or more were used. The purpose of this work was to develop two proposals of climate classifications based on the water balance, according to the Thornthwaite method. The potential evapotranspiration (PET) was estimated by the methods of Thornthwaite and Hargreaves. Despite the expected difference in the results of the potential evapotranspiration due to the way this is estimated by both procedures, the climate classification varies between sub-humid, to humid to excessively humid.*

**Key words:** Caribbean, climate classification, potential evapotranspiration, Costa Rica, Central America.

## 1. Introducción

El clima es esencial para la vida, brinda bienestar, salud y prosperidad tanto para el ser humano como para la flora y la fauna. El conocimiento sobre el comportamiento temporal y espacial del tiempo y clima es de gran interés para el ser humano ya que influye en qué, cómo y de qué forma se llevan a cabo sus actividades.

En la agricultura, el clima define cuáles cultivos se pueden desarrollar en cierto espacio geográfico, sin sufrir estrés hídrico o por el contrario, bajo excesos de agua que impidan la germinación. Estudiar las variaciones periódicas del medio atmosférico en que viven las plantas y cómo esta variabilidad influye en los cultivos, es el fin óptimo para obtener una mejor producción al menor costo (Lesdema, 2000).

El estudio de este recurso implica su categorización a través de una clasificación climática, que es una aproximación del estado medio de la atmósfera sobre un espacio geográfico. Este proceso va a depender de los datos de entrada y pueden haber infinitas combinaciones por lo que se trata de resaltar los datos más generales (Miller, 1975). La clasificación climática consiste, básicamente, en agrupar regiones geográficas que cuenten con características climáticas comunes (Mather, 1974). Estas características climáticas comunes se derivan de uno o más elementos, o por medio de un balance hídrico (Thornthwaite, 1948).

Se han desarrollado dos tipos de clasificaciones: 1) genéticas, que se basan en los factores que generan diversidad climática y 2) empíricas, que combinan diferentes elementos del clima (Cuadrat y Pita, 1997; Oliver, 2005). En este trabajo se tiene interés por las de tipo empírico, tomando en consideración el comportamiento de elementos como la precipitación y temperatura (Fallas y Oviedo, 2003). De este tipo se pueden mencionar las clasificaciones de Köppen, Thornthwaite (1948) y Budyko (Cuadrat y Pita, 1997).

Entonces, un grupo climático es un área que se caracteriza por un comportamiento homogéneo de los elementos climáticos, estos se determinan a partir de un índice hídrico, en donde dicho porcentaje se ubica dentro de una provincia de humedad que es la utilizada para la nomenclatura de dichos grupos (Herrera, 1985).

La configuración topográfica en Costa Rica, un eje montañoso orientado de noroeste a sureste que origina dos vertientes: Pacífico y Caribe, genera gran variabilidad térmica y pluviométrica (Vargas, 2006). La primera, en términos generales, por estar a sotavento posee un régimen de menor humedad atmosférica, exceptuando el Pacífico Sur donde la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) juega un papel importante en la configuración del tiempo atmosférico y por ende en el clima (Vargas, 2006). Mientras que la ladera a barlovento recibe los vientos alisios del noroeste que cargados de humedad determinan el clima de la vertiente Caribe, donde llueve prácticamente todo el año. En Barra del Colorado, por ejemplo, se registró una precipitación media anual de 5.696,7 mm durante el periodo de 1951-1982 (Estación 69533 del Instituto Meteorológico Nacional, IMN).

Para el Caribe, estudios previos describen las características del clima, donde hacen una revisión de las variables reportadas por la estación del aeropuerto de Limón (81003). Precipitación, temperatura, heliofonía, radiación solar, humedad relativa y viento fueron analizadas para un periodo 72 años (IMN, 2013). La precipitación presenta dos periodos intensos, el primero de mayo a agosto y el segundo de noviembre a enero. La temperatura tiene poca variación mensual, pero es apreciable la variación diaria. El sol podría brillar como máximo 12,6 horas en junio y como mínimo 11,4 horas por día en diciembre, en ausencia de nubes, pero por la abundante nubosidad reduce las horas de sol astronómicamente posibles.

Sáenz y Amador (2014) analizaron el ciclo diurno para el Caribe de Costa Rica donde resaltan una marcada variabilidad espacial en el ciclo diurno estacional y en la distribución espacial de la precipitación. Se observaron cuatro regímenes de variabilidad diurna: oceánico (máximos entre las 6 y 9 tiempo solar local-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).

Solano y Villalobos (2005) proponen una regionalización climática con regiones y subregiones para Costa Rica, donde determinan cinco subregiones para la región del Caribe con base en provincias térmicas y pluviométricas y régimen de lluvia anual. A cada subregión se le asocia un tipo de formación vegetal que responde a las condiciones climáticas de la zona. La subregión atlántica 1 (RA1) presenta el bosque muy

húmedo tropical y el bosque muy húmedo montano bajo, la RA2 con bosque muy húmedo subtropical y bosque muy húmedo montano bajo. RA3, RA4 y RA5 tienen bosque húmedo tropical.

De forma regional, Fallas y Oviedo (2003) presentan una clasificación de Köppen para América Central. En Costa Rica, el Pacífico tiene un clima tropical de sabana (Aw), caracterizado por tener la estación seca en el invierno astronómico, la lluvia es abundante y la temperatura es superior a los 18 °C todos los meses. En cuanto al Caribe, se define un clima tropical húmedo (Af), en donde llueve todos los meses y no posee una estación seca bien definida.

El objetivo de este trabajo es elaborar dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe de Costa Rica con el fin de observar las diferencias a partir de dos métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), el de Thornthwaite y Hargreaves. Para ello se analizaron variables meteorológicas con registros superiores a diez años en busca de patrones climáticos y así asociar las estaciones a un grupo climático con base en Herrera (1985), para elaborar las clasificaciones climáticas según el balance hídrico que es la base para el sistema de Thornthwaite (Mather, 1974).

Este artículo ha sido organizado de la siguiente manera. En la siguiente sección la descripción de los métodos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración potencial y la elaboración del material cartográfico. En la sección de resultados se presentan mapas de la distribución espacial de las diferentes variables y las clasificaciones climáticas, así como el cuadro con la descripción de los grupos climáticos identificados. Para finalizar se presentan la discusión de los resultados y las conclusiones.

## 2. Metodología

### 2.1. Caracterización del Área de Estudio

La región de interés es la vertiente Caribe de Costa Rica con una extensión de 30 860 km<sup>2</sup>. Posee una elevación máxima de 3820 ms.n.m. en el cerro Chirripó (Cordillera de Talamanca). Se hace un énfasis en el área donde se cultiva banano (650,15 km<sup>2</sup>), la cual corresponde a 2,11 % de la vertiente Caribe (Figura 1).

La costa de la vertiente Caribe tiene una extensión de aproximadamente 200 km y existe una separación entre el Mar Caribe y el Océano Pacífico que no supera los 300 km (Díaz, 1981). La condición ístmica y la cercanía al mar generan que la interacción tierra-océano tenga influencia directa sobre el clima en Costa Rica, así como los impactos que pueden producir los distintos fenómenos meteorológicos (Alfaro y Quesada, 2010; Alfaro y Pérez-Briceño, 2014).



Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

## 2.2. Datos empleados

Se recopilaron datos de estaciones meteorológicas del IMN, del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), así como de instancias privadas como BANACLIMA de la Corporación Bananera Nacional (CORBANA) identificadas en el Cuadro 1 del código 1 al 9 y BANDECO de la empresa Del Monte del código 12 al 22, que estuvieran dentro del área de estudio. También se usó la estación de Bocas del Toro en Panamá, que proporcionó la Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA).

En total, se compilaron 123 estaciones meteorológicas donde la variable principal es la precipitación con registros de la media de los acumulados mensuales, sin embargo, la información entre estaciones era muy desigual por lo que fue necesario definir criterios de selección para validar y sistematizar la clasificación. Los parámetros establecidos fueron:

1. Estación meteorológica con registro de datos de precipitación media mensual mayor a un periodo de 10 años, con excepción de las estaciones de BANACLIMA que cuentan con registro de siete años y que son incluidas en este estudio.
2. Que la estación meteorológica cuente con un registro casi-continuo de datos, no se consideran las estaciones que tengan periodos mayores a un año sin datos.
3. La estación debe tener registro dentro de los últimos 50 años aproximadamente, es decir desde 1960 al 2011 (se dispone de datos hasta esa fecha). Si bien es cierto, los registros de cada estación podrían cubrir periodos distintos entre esos años, Amador *et al.* (2013), Hidalgo (2013) e Hidalgo *et al.* (2016) encontraron que la región no presenta una tendencia clara hacia condiciones más secas o húmedas durante la segunda mitad del siglo XX. Además, los resultados varían también dependiendo del conjunto de datos usado.

Por tanto, una vez aplicado el filtrado anterior, 82 estaciones cumplen con los requisitos (Cuadro 1) y no se completaron los datos faltantes, por lo que se usó los registros existentes que cumplían con los tres criterios anteriores. Se revisó la disponibilidad de datos de temperatura y se encontró que el 50% de las estaciones cuenta con los datos de temperatura media, mínima y máxima mensual, por lo que 41 estaciones tienen el valor asociado de la estación más cercana (línea recta), tomando en cuenta la altitud de la estación (IMN, 2013). Cabe recalcar que la zona de estudio, posee poca variabilidad térmica en las regiones bajas, por lo que es válido realizar la asociación de datos (Amador *et al.*, 2013).

Se cartografiaron las variables climáticas para conocer su comportamiento espacial, se interpoló con el método kriging universal con un programa de Sistema de Información Geográfica (SIG), ArcGIS 10.0 Licencia Institucional-UCR. El kriging supone que la distancia entre dos puntos de muestra que reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie (ESRI, 2016). La ecuación es:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

Donde:

$Z(S_i)$  = el valor medido en la ubicación  $i$

$\lambda_i$  = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$

$S_0$  = la ubicación de la predicción

$N$  = la cantidad de valores medidos

Los pesos están optimizados utilizando el modelo de semivariograma, la ubicación de las muestras y todas las interrelaciones relevantes entre los valores conocidos y desconocidos. La técnica también proporciona un “error estándar” que se puede usar para cuantificar los niveles de confianza (Clark y Harper, 2007). Por la falta de estaciones en el sector norte del área de estudio, la información generada en esta zona hay que tomarla con cuidado.

Cuadro 1: Información de las estaciones meteorológicas usadas.

Código	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.n.m.)	Registro de años (precipitación)
3	Cartagena	-83,63740	10,26440	54,3	7
4	Bananera Siquirres	-83,49120	10,11520	49,1	7
5	Limofrut B	-83,28050	10,09340	14,3	7
6	Agrotubérculos	-82,79690	9,66010	5,3	7
7	PAIS	-82,62650	9,52080	16,9	7
8	Las Valquirias	-83,64980	10,42460	38,6	7
9	Pénjamo	-83,90610	10,43080	66,7	7
12	Bananita	-83,2230	10,0849	5	20
13	Duacari 1	-83,6231	10,3618	36	12
14	Duacari 4	-83,6497	10,3331	43	19
15	Duacari 5	-83,6431	10,3063	44	20
16	Filadelfia	-83,0441	9,9418	6	20
17	Freehold	-83,4581	10,1081	25	20
19	Imperio 2	-83,4127	10,1806	12	20
20	Monte Líbano	-83,3302	10,0832	15	20
21	Perdiz	-83,7883	10,3377	70	21
22	San Pedro	-83,7604	10,4179	55	20
7076	INCSA	-83,91667	9,83333	ND	15
69090	San Carlos	-84,75000	11,10000	40	36
69503	Puerto Viejo	-84,01667	10,46667	37	42
69506	San Miguel de Sarapiquí	-84,1833	10,3166	500	51
69533	Barra de Colorado	-83,5833	10,7666	5	32
69537	Selva (2)	-83,9833	10,4166	40	53
69548	Jilguero	-84,71670	10,45000	625	37
69571	Sangregado	-84,7666	10,4833	500	20
69586	La Tirimbina	-84,1	10,4	200	27
69591	Los Chiles	-84,66667	10,71667	55	31
69609	Coopesca	-84,4166	10,3166	650	24
69633	Comando Los Chiles	-84,7166	11,0333	40	17
69661	Ciudad Quesada	-84,4166	10,3	700	13
69679	Upala	-85,00000	10,83333	60	43
71002	La Mola	-83,76667	10,35000	70	24
71005	Finca 6	-83,78333	10,30000	70	25
71007	Caribe S.A.	-83,75000	10,50000	40	23
71008	Tortuguero Norte	-83,53333	10,55000	5	18
71011	Jalova	-83,4	10,333	5	13
71017	Ticabán	-84	10,04	60	10
73007	Peralta (F.C)	-83,61667	9,96667	638	18
73008	La Margarita	-83,71667	9,90000	1080	21
73009	El Cairo	-83,53333	10,11667	ND	24
73010	CATIE	-83,63330	9,88333	602	69
73013	Los Diamantes	-83,76667	10,21667	249	37
73025	Las Delicias	-83,91667	10,16667	200	10
73044	La Suiza	-83,61667	9,85000	620	21
73049	La Mola 2	-83,58333	10,28333	50	17
73055	La Amistad	-83,5666	9,9833	560	21
73064	Willianburg	-83,58333	10,10000	95	15
73065	Santa Clara	-83,80000	10,28333	70	21

Código	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.n.m.)	Registro de años (precipitación)
73079	Oriente	-83,71667	9,78333	623	20
73081	Volcán Irazú	-83,85	9,9833	3400	23
73090	Las Mercedes	-83,61667	10,16667	95	14
73091	El Carmen	-83,48	10,2	15	40
73094	El Tacatal	-83,7	9,9	860	12
73103	Sitio Matas	-83,6111	9,8666	900	21
73109	Guayabo	-83,6833	9,9666	1003	28
73111	Hda. Victoria	-83,7666	10,2666	80	20
75002	Siquirres	-83,5166	10,2666	70	28
75003	Platanillo	-83,56667	9,81667	889	32
75004	Pacuare	-83,51667	9,81667	800	22
75007	Rocas Blancas	-83,5	9,75	825	23
75013	Freeman	-83,36667	10,20000	5	88
75022	ASBANA	-83,4666	10,0333	440	22
77001	Batán	-83,33330	10,08330	15	43
77002	La Lola	-83,38	10,1	40	62
79005	Moravia Chirripó	83,45	9,833	1200	44
81001	Filadelfia	-83,098225	9,948566	100	13
81003	Limón Aeropuerto	-83,05	10	5	70
81005	Aerop. Limón	-83,016	9,95	7	14
83003	Asunción	-83,166667	9,9	30	46
83004	San Andrés	-82,98333	9,86667	30	24
85001	Pandora	-82,95000	9,75000	17	27
85003	Fortuna Valle Estrella	-83,0166	9,7333	30	19
85006	Puerto Vargas	-82,8166	9,7333	3	34
85021	Hitoy Cerere	-83,033	9,666	100	13
87001	Chase	-82,86667	9,61667	40	29
87003	Daytonia	-82,63333	9,51667	10	17
87004	Nivecita	-82,71667	9,56667	20	20
87006	Sixaola	-82,6	9,5	11	26
87010	Amubri	-82,95	9,516666	70	12
87011	Volio Bribri	-82,9166	9,8166	310	15
87013	Sixaola	-82,6166	9,533	10	15
93002	Bocas del Toro	-82,25000	9,33333	2	37

### 2.3. Clasificación climática

Para elaborar una clasificación climática según la metodología de Thornthwaite se requieren cuatro factores (Mather, 1974):

1. Índice hídrico: es expresado como la diferencia entre el índice de humedad y el índice de aridez. Las provincias de humedad son las que dan nombre a los grupos climáticos, es decir a partir de estas, se organizan dichos grupos (Cuadro 2).
2. Variación estacional de la humedad: se refiere a la distribución de la precipitación a lo largo del año, y se indica con f, s, y w en letras minúsculas; que se refiere a buena distribución de la precipitación a lo largo del año; presenta un verano seco (época seca marcada) o una estación lluviosa respectivamente.
3. Índice térmico: la metodología de Thornthwaite supone la evapotranspiración potencial como índice térmico. Hay nueve clasificaciones que se distinguen con una letra mayúscula; por ejemplo: megatermal (A'), mesotermal (B'), microtermal (C'), tundra (D') e hielo (E').

4. Índice de variación térmica: este índice indica la cantidad de energía que recibe durante la época seca; varía entre 25 y 100 para cualquier clima.

Cuadro 2: Provincias de humedad.

Denominación	Índice hídrico (%)	Simbología
Excesivamente húmedo (pluvial)	600-300	H
Muy húmedo	300 - 100	G
Húmedo	100 - 80	F
Húmedo	80 - 60	E
Húmedo	60 - 40	D
Húmedo	40 - 20	C
Subhúmedo húmedo	20 - 0	B
Subhúmedo seco	-33,3 - 0	A

Fuente: Herrera (1985) y Mather (1974).

Siguiendo la metodología, se calcularon los índices de aridez y humedad, los cuáles determinan el índice hídrico de una región. El índice de aridez anual ( $I_a$ ) es la relación entre el déficit de agua anual y la necesidad de agua anual (ecuación 1). El índice de humedad ( $I_h$ ) es la relación entre el exceso de agua y la necesidad de agua para evaporarse, que va teóricamente desde 2% a 665% (ecuación 2). Finalmente, el índice hídrico ( $I_m$ ) es el balance entre el índice de aridez y el índice de humedad (ecuación 3).

$$I_a = \frac{\text{Déficit de agua anual}}{\text{Necesidad de agua anual}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$I_h = \frac{\text{Exceso de agua anual}}{\text{Necesidad de agua anual}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$I_m = I_h - I_a \quad (3)$$

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, que es la medida de la transferencia máxima de agua posible a la atmósfera bajo condiciones ideales de textura del suelo y vegetación (Thornthwaite, 1948), se utilizaron dos métodos con el fin de mostrar las diferencias en las clasificaciones climáticas: Thornthwaite (ecuación 7), que es recomendable para las tierras llanas y húmedas, pero no para las tierras montañosas interiores; y la de Hargreaves (1981) (ecuación 10).

La ecuación de Thornthwaite utiliza la temperatura media mensual, el principal controlador de la evapotranspiración, ya que existe una relación entre este elemento del clima y la evapotranspiración, en los meses de 30 días y con 12 horas de radiación solar (Thornthwaite, 1948). Esta relación se expresa como:

$$e = c T^a \quad (4)$$

donde  $e$  es la evapotranspiración potencial mensual en centímetros,  $T$  es la temperatura mensual en °C, y los coeficientes  $c$  y  $a$  varían de un lugar a otro, aunque pueden ser calibrados para un determinado lugar si se posee la información del caso.

A partir del dato de temperatura media mensual se calcula el índice térmico mensual que varía de 0 a 160, con la ecuación 5.

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (5)$$

La sumatoria de los 12 meses de  $i$ , es el índice de variación térmica anual ( $I$ ). La relación entre  $I$  y  $a$  está dada por la ecuación 7, donde este exponente varía de 0 a 4,25.

$$I = \sum i_n \quad (6)$$

$$a = 0,6751 \cdot 10^{-6} I^3 - 0,771 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,01792 I + 0,49239 \quad (7)$$

Por tanto, la evapotranspiración potencial está dada por la ecuación 8, según Thornthwaite (1948):

$$e = 1,6 \left( 10 \frac{T}{I} \right)^a \quad (8)$$

Luego, se aplica un valor de corrección según la latitud y el mes a considerar,

$$e_c = f \cdot e \quad (9)$$

donde:

$e_c$  = Evapotranspiración mensual corregida, en mm

$f$  = Factor de corrección para 10° Norte (Cuadro 3)

$e$  = Evaporación mensual sin corregir, en mm

Cuadro 3: Factor de corrección  $f$  para 10° Norte. Este factor está en función de la duración de horas sol, expresada en unidades de 30 días y 12 horas (Thornthwaite, 1948).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99

La ecuación de Hargreaves determina la ETP de la siguiente manera:

$$ETP = 0,17 \cdot RA \cdot \sqrt{TD} \cdot 0,0075 \cdot (32 + 1,8 T)N \quad (10)$$

donde:

$ETP$  = Evapotranspiración potencial media mensual (mm)

$RA$  = Radiación extraterrestre en el tope de la atmósfera, en milímetros diarios de agua evaporada (Cuadro 4)

$T$  = Temperatura media mensual (°C)

$TD$  = Diferencia entre la temperatura máxima y mínima media mensual (°C)

$N$  = Número de días del mes

Cuadro 4: Radiación extraterrestre mensual en el tope de la atmósfera,  $RA$ , expresada en evaporación equivalente en mm/día, para el hemisferio norte (FAO, 1976).

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
10°	13,2	14,2	15,3	15,7	15,5	15,3	15,3	15,5	15,3	14,7	13,6	12,9

Con la determinación de los índices de aridez, humedad se realizó un balance entre lo que llueve y lo que se evapora a través del índice hídrico, que sirvió de insumo para establecer los grupos climáticos de la clasificación en conjunto con las provincias de humedad y para la delimitación se utilizaron criterios de altitud a partir de curvas cada 100 m en escala 1:250.000 de los mapas base del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Costa Rica.

### 3. Resultados

La Figura 2 muestra la distribución espacial de la precipitación media anual, en donde se observa una alta variación espacial. Hacia el sureste en los alrededores de Bribri y Bocas del Toro (Panamá) la cantidad de lluvia muestra valores relativamente bajos (3000 mm anuales), mientras que en el noroeste cerca de las localidades de Puerto Viejo (Sarapiquí), Guápiles y Tortuguero se presentan valores altos (5000 mm anuales). La estación con el máximo de lluvia media anual es Jilguero (Código de Estación: 69548) con 5500 mm, y el mínimo es Comando Los Chiles (Código de Estación 69633) con 1700 mm de lluvia anual.

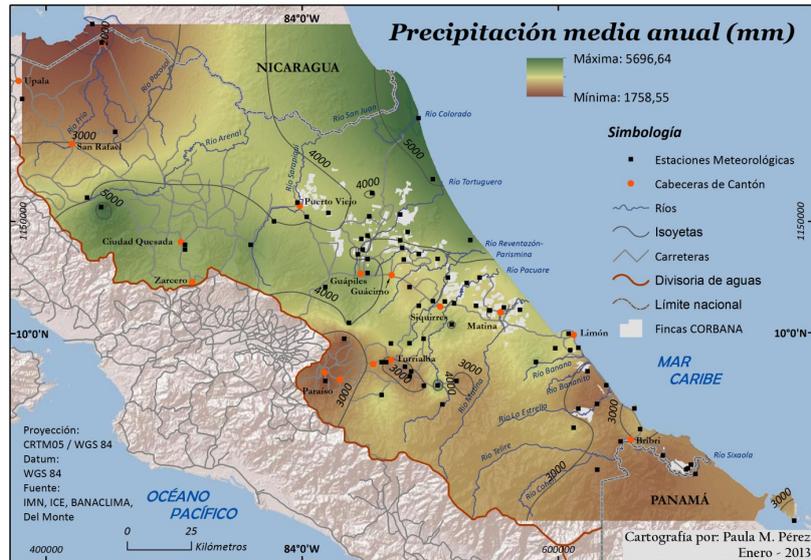


Figura 2: Distribución espacial precipitación media anual.

En cuanto a la temperatura media anual (Figura 3) se observa poca variabilidad térmica a lo largo de la zona litoral, con valores altos de temperatura media entre los 25°C y 26°C. El patrón de las isotermas es paralelo hasta la divisoria de aguas, donde se encuentra la estación Volcán Irazú con un mínimo de temperatura media de 8,1°C. Hacia las estaciones Caribe S.A. (71007) y Tortuguero Norte (71008) se aprecia una pequeña disminución de la temperatura media anual. En cuanto a la distribución espacial de la temperatura mínima anual, se observó que en la llanura se mantiene aproximadamente constante con valores mínimos de 20°C, disminuyendo hacia las zonas montañosas, el mínimo es en el Volcán Irazú con 4°C a 2027 m.s.n.m. La distribución geográfica de la temperatura máxima en las partes bajas es continua con poca variabilidad, con un promedio de 30°C, y el mínimo de la temperatura máxima es en el Volcán Irazú con 11,5°C.

Una vez realizado el cálculo de la ETP por ambos métodos, se establece que el 88% de los casos la ETP por la ecuación de Hargreaves es mayor que la ecuación de Thornthwaite. La Figura 4 muestra las nueve estaciones donde la ETP según la ecuación Hargreaves (10) fue mayor que la ETP de Thornthwaite (8).

La ecuación de ETP de Thornthwaite (Figura 5a), propone una distribución regular a lo largo del litoral con valores mínimos de alrededor de 570 mm hasta 1800 mm (alrededor del Lago de Nicaragua), mientras que en la zona Caribe los valores oscilan entre 1200 y 1400 mm de ETP.

La ecuación de ETP de Hargreaves (Figura 5b) presenta valores entre 820 mm y 2200 mm aumentando la cantidad de agua evaporada potencial en la región, esto responde a las altas temperaturas y a la poca amplitud térmica en la región húmeda caribeña, que muestra núcleos en la parte sureste de la zona de estudio (Caribe sur). Hacia el norte se observan los valores máximos de agua potencial a evaporarse.

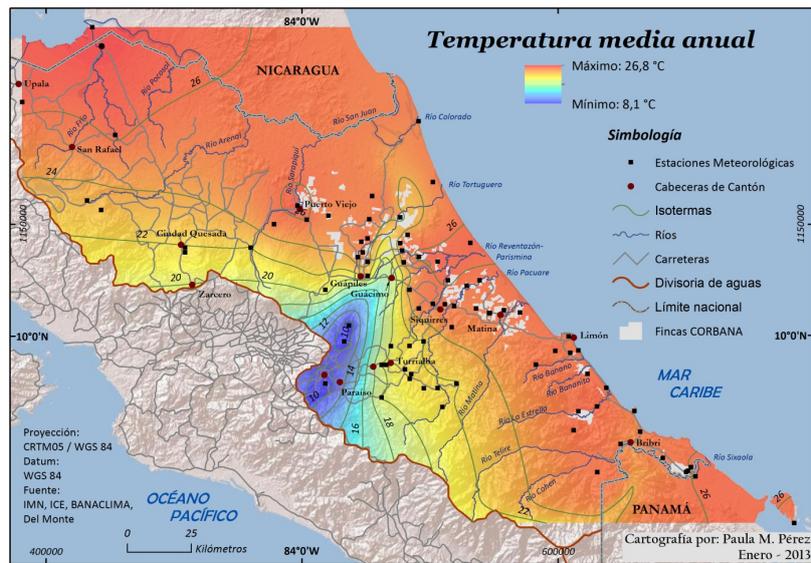


Figura 3: Distribución espacial de la temperatura media anual.

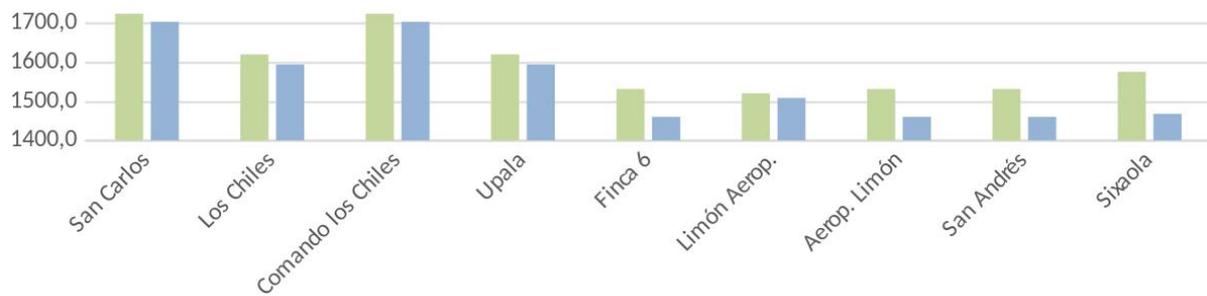


Figura 4: Comparación de las ecuaciones de Thornthwaite y de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración potencial expresada en mm.



Figura 5: Distribución espacial de la evapotranspiración potencial utilizando el método de a) Thornthwaite y b) Hargreaves.

En cuanto al índice de humedad, en la ecuación de Thornthwaite la distribución espacial muestra valores bajos en el noroeste y sureste (0-100%), ya que son áreas que presentan precipitaciones inferiores al resto de la región, pero mantienen altas temperaturas lo que se traduce en una menor evapotranspiración potencial en comparación con el resto del zona de estudio. En el sector norte se forma un núcleo de

humedad (201-300%) y hacia las zonas montañosas, aumenta la humedad ya que las altas precipitaciones y temperaturas no tan altas ocasionan que se mantenga la humedad en el sistema, generando valores de hasta 665% en la estación Ticabán (71017).

En el caso del índice de humedad utilizando la ETP de Hargreaves los valores oscilan entre 3% y 430%. Hacia las partes altas de la vertiente Caribe se mantienen los valores altos de humedad, a pesar que la ETP es mayor que en el caso anterior. El índice hídrico (Figura 6a y 6b) tiene el mismo comportamiento que el índice de humedad como consecuencia que el índice de aridez tiene valor cero, es decir no hay déficit de agua en la región.

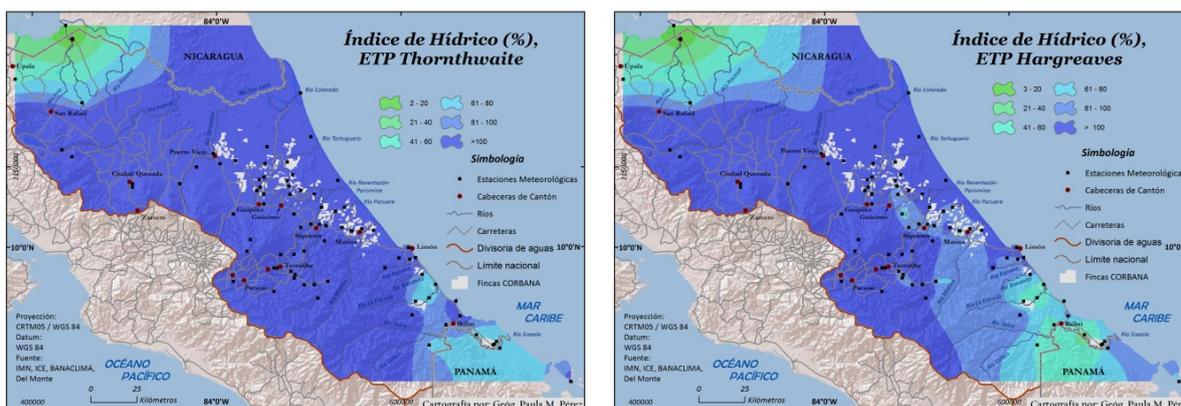


Figura 6: Índice hídrico utilizando los valores de Evapotranspiración Potencial de a) Thornthwaite, b) Hargreaves.

Se determinaron los grupos climáticos y se les asignó una provincia de humedad (Cuadro 2). Hay zonas que no fueron clasificadas por falta de información, como en la zona montañosa de la Cordillera de Talamanca. El número que acompaña a los grupos hace referencia a la provincia térmica e índice de humedad.

La Figura 7 muestra la propuesta para clasificación utilizando la ecuación de Thornthwaite (8), a escala 1:1.100.000, en donde se obtienen 7 grupos climáticos, uno de la provincia subhúmeda húmeda (B3), uno provincia húmeda (E6) y cinco de la provincia muy húmeda (G2a, G4, G7a, G7b y G14). La nomenclatura para cada grupo está descrita en el Cuadro 5.

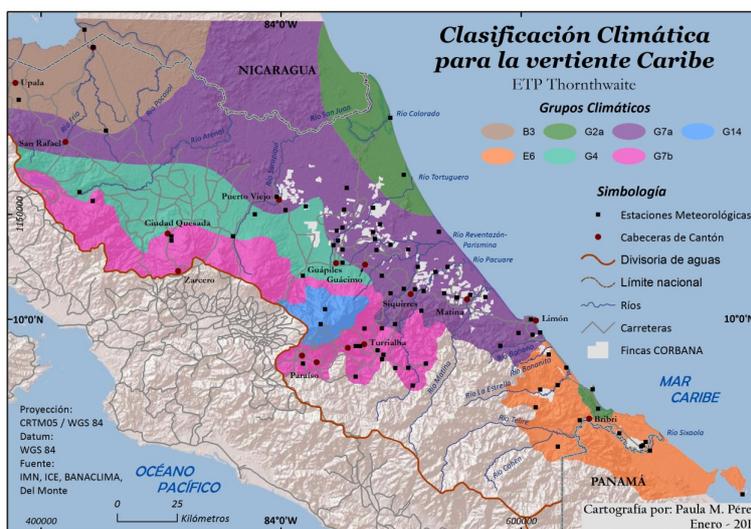


Figura 7: Clasificación climática para la vertiente Caribe, utilizando la ecuación de Thornthwaite.

La Figura 8 es la propuesta de clasificación climática para la vertiente Caribe, utilizando la ecuación de Hargreaves (10) para estimar la ETP, a escala 1:1.100.000, donde se determinaron 10 grupos climáticos descritos en el Cuadro 5, aquí se observa mayor detalle en su regionalización. La provincia menos húmeda (B3) se localiza al norte con bajas precipitaciones y altas temperaturas. La zona litoral norte pertenece a la provincia de humedad G (muy húmeda) y varía por los rangos de evapotranspiración potencial. El litoral Caribe Sur es menos húmedo por las altas temperaturas y pluviosidad moderada, en él se encuentran los grupos E6 y F6, ambos en la provincia de humedad: “húmeda”. En las partes montañosas la humedad es mayor y por ello se encuentran ahí los grupos climáticos con mayor humedad G14 y H6; muy húmedo y excesivamente húmedo, respectivamente. El 100% de las estaciones para ambas ecuaciones de ETP tienen índice de aridez igual a 0, lo que indica que toda la región en estudio no tiene déficit de agua a lo largo del año.

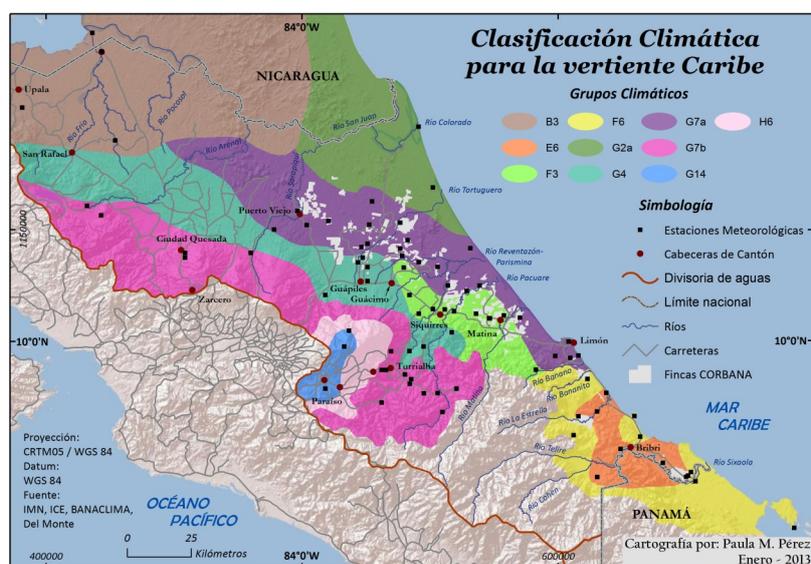


Figura 8: Clasificación climática para la vertiente Caribe, utilizando la ecuación de Hargreaves.

#### 4. Discusión de los resultados

Fallas y Oviedo (2003) concuerdan con este estudio que a una escala macro, el Caribe es una zona de clima húmedo tropical, donde la precipitación excede por mucho la evaporación. Solano y Villalobos (2005) señalan que la región Caribe posee un clima tropical húmedo, donde la lluvia es abundante, siendo más acentuada en las partes montañosas donde llueve todo el año. La distribución espacial de la precipitación anual no es uniforme en la región (Figura 2), al igual que el comportamiento espacial de la precipitación diaria, donde se observan cuatro regímenes variabilidad diurna (Sáenz, 2014; Sáenz y Amador, 2016). Estos autores concluyen que 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 y por ende la precipitación anual. Fernández *et al.* (1996) encontraron que los máximos de precipitación en la vertiente del Caribe de Costa Rica se encuentran a alturas intermedias en las cumbres y las zonas costeras.

La Figura 3 refleja que la temperatura no varía en la franja litoral y ésta va disminuyendo conforme se asciende hacia la zona montañosa, Cordillera de Talamanca. En la descripción del clima del Cantón de Limón (IMN, 2013) el mapa de temperaturas muestra una distribución similar, donde la máxima es de 28°C y la mínima de 12°C en la parte alta de la cuenca. Este comportamiento se repite en los valores de temperatura máxima y mínima anual.

Cuadro 5: Grupos climáticos.  $\overline{P}_a$ : Precipitación media anual;  $\overline{T}_a$ : Temperatura media anual;  $\overline{ETP}_a$ : Evapotranspiración potencial anual;  $I_a$ : Índice de aridez;  $I_h$ : Índice de hídrico.

Grupo	Características	$\overline{P}_a$ (mm)	$\overline{T}_a$ (°C)	$\overline{ETP}_a$ (mm)	$I_a$ (%)	$I_h$ (%)
B3	Clima subhúmedo húmedo, muy caliente, con un déficit pequeño de agua	1710-2600	25-27	>1710	0-10	0-20
E6	Clima húmedo, caliente, con déficit pequeño de agua	2500-3100	22-26	1565-1920	<3	60-80
F3	Clima húmedo, muy caliente, con déficit pequeño de agua	3080-3420	25-27	>1710	0-10	80-100
F6	Clima húmedo, caliente, con déficit pequeño de agua, o sin déficit	2800-3420	22-26	1565-1710	<3	80-100
G2a	Clima húmedo, caliente, con déficit pequeño de agua	2200-2740	25-27	>1450	0-2	100-300
G4	Clima muy húmedo, caliente, con déficit pequeño de agua o sin déficit	3130-4700	21-26	1040-1515	0-10	100-300
G7a	Clima húmedo, caliente, con déficit pequeño de agua	2840-4800	24-26	1420-1656	0-10	100-300
G7b	Clima húmedo, caliente, con déficit pequeño de agua	2100-5600	18-22	1020-1656	0-10	100-300
G14	Muy húmedo, frío, con déficit pequeño de agua	1700-3200	7-9	820-997	0-5	100-300
H6	Clima excesivamente húmedo, frío, con un déficit muy pequeño de agua	3400-4400	6-9	855-997	0-5	300-600

El método utilizado en el cálculo de la ETP, influye en el resultado de los índices ya que según sea el caso ofrecerá un resultado mayor en la necesidad de agua para evaporarse. En el caso de Thornthwaite (8), los valores de ETP son en casi todos los casos inferiores a Hargreaves (10), esto sucede porque al utilizar una mayor variedad de datos de entrada, los resultados generados se adaptan a las regiones climáticas costarricenses y a la infraestructura meteorológica de datos existente (Herrera, 1985).

La distribución de la ETP de Thornthwaite muestra una distribución muy regular y va acorde a la comportamiento de la temperatura media mensual (Figura 3 y Figura 5a), mientras que en la de Hargreaves (Figura 5b) se ven patrones espaciales que responden al esquema de precipitación y la temperatura, generando características particulares, por ejemplo, la disminución de ETP en la zona entre el río Sarapiquí y el río Tortuguero; el aumento en la región cercana a Bribri donde se denota un núcleo de más ETP, así como otras variaciones cercanas a Siquirres, Matina y Limón. El IMN (2013) calculó la ETP para la estación del Aeropuerto de Limón (81003) con un registro de 72 años (1941-2012) con la ecuación de Hargreaves, el cual es congruente con el valor calculado en este estudio para un periodo de 69 años (1941-2010).

Al contrastar los métodos para el cálculo de la ETP, se observó que la de Thornthwaite propone una distribución regular a lo largo del litoral con valores mínimos de 570 mm hasta 1800 mm, alrededor del lago de Nicaragua, mientras que en la zona Caribe, propiamente, los valores oscilan entre 1200 y 1400 mm de evapotranspiración potencial anual. La de Hargreaves presenta valores entre 820 mm y 2200 mm aumentando la cantidad de agua evaporada potencial en la región, esto responde a las altas temperaturas y a la poca amplitud térmica estacional en la región húmeda caribeña con núcleos en la parte sureste de la zona de estudio (Caribe Sur). Hacia el norte de la región se observan los valores máximos de potencial de agua a evaporarse.

Thornthwaite y Hargreaves, son solo dos de varios métodos disponibles para evaluar la ETP (Lu *et al.*, 2005). Los métodos para determinar esta variable presentan diferentes tipos de sesgos, algunos de ellos vinculados al número de parámetros usados para su cálculo (Lu *et al.* 2005; Bautista *et al.*, 2009). Bautista *et al.* (2009) indican que se entiende el amplio uso de ambos métodos para el cálculo de la ETP

por la poca disponibilidad de datos nivel mundial pero que deben ser calibrados para las condiciones locales.

El índice hídrico refleja que la vertiente del Caribe es predominantemente perhúmedo, porque el índice de aridez para toda la región resultó que es pequeño o sin ningún déficit de agua mientras que el índice de humedad indica que gran parte del área posee exceso grande de agua en invierno y en verano (Herrera, 1985).

A pesar de haber cierta regularidad en los patrones, es posible identificar zonas con características más similares entre sí para agruparlas en grupos climáticos. La clasificación climática se realizó utilizando ambas ecuaciones para la ETP, sin embargo se recomienda utilizar la ecuación de Hargreaves (10), por los resultados que arroja en función de las variables que emplea.

Hernández y Fernández (2015) utilizaron los valores umbrales pentadales de la evaporación específicos para cada región climática del país, por medio del método FAO-56 para el cálculo de la evapotranspiración de referencia e identificando los puntos de inflexión en donde la péntada de evaporación y precipitación coinciden. La zona Caribe presenta un periodo lluvioso con un valor umbral de 25 mm, en el período comprendido entre el 12-16/04 y el 17-21/03, mientras que un pequeño periodo seco con el mismo umbral se aprecia del 22-26/03 hasta 02-06/05, en esta región no se observa un veranillo (Maldonado *et al.*, 2016) pero si se da una disminución de la evaporación el 01-05/07. En la Zona Norte la época seca inicia del 26-30/01 al 02-06/05, con un umbral de 28-34 mm, su época lluviosa va del 07-11/05 hasta 21-25/01, sin ocurrencia del veranillo.

La regionalización elaborada por Herrera (1985) a escala 1: 250 000 en comparación con la propuestas en este estudio (escala 1:1.100.000), mantienen similitud en los rasgos más importantes pese a la diferencia de escala. Se mantiene la categoría B3 para la zona noroeste del estudio, el área de las llanuras de Tortuguero y Barra del Colorado mantiene la G2a e intercambia con el G7a. Hacia el centro del área se mantienen los grupos F6, G4, G7a y G7b; y hacia el sur los estudios son homólogos en identificar el área como E6. La variabilidad que muestra Herrera (1985) en las elevaciones altas del área de estudio no es posible determinarlas a la escala que aquí se trabajó.

## 5. Conclusiones

Las clasificaciones climáticas realizadas en este trabajo confirman que la vertiente Caribe es una región húmeda. La precipitación es abundante y se distribuye de forma no homogénea en el espacio, con temperaturas altas que propician valores elevados de evapotranspiración potencial.

Al utilizar un método más complejo para el cálculo de la ETP como es el de Hargreaves, se encontraron diferencias en el balance hídrico ya que este método supone mayor evaporación que el de Thornthwaite, lo que requiere un mayor aporte del recurso hídrico para mantener el balance de agua en el sistema. Un aspecto importante de resaltar es que hay otros métodos disponibles para evaluar la ETP (Penman, por ejemplo es uno de ellos), aunque en general el número de variables, como lo discuten Lu *et al.* (2005), necesarias para su uso es más exigente y no siempre éstas están disponibles.

La clasificación climática para la vertiente Caribe utilizando Hargreaves, arrojó 10 grupos climáticos, con lo que se obtuvo un mayor detalle en la regionalización. La provincia menos húmeda (B) se localiza al noroeste con bajas precipitaciones y altas temperaturas. El litoral noreste pertenece a la provincia de humedad G (muy húmeda) y varía por los rangos de evapotranspiración potencial. El litoral Caribe sur es menos húmedo con altas temperaturas y pluviosidad moderada, en él se encuentran los grupos E6 y F6, ambos en la provincia húmeda. En las partes montañosas la humedad es mayor y por ello se encuentran ahí los grupos climáticos con mayor humedad G14 y H6, muy húmedo y excesivamente húmedo, respectivamente. Cabe resaltar que en esta zona se encuentra el Parque Nacional Braulio Carillo característico por ser un bosque siempre verde (Vargas, 2006).

Al analizar los resultados obtenidos, se recomienda utilizar la clasificación climática por el sistema de Thornthwaite a partir del cálculo de la ETP usando Hargreaves, ya que esta toma en cuenta más variables físicas, como la diferencia entre la temperatura mínima anual y temperatura máxima anual, lo que la hace más robusta en sus resultados en comparación a la ETP de Thornthwaite.

Una realidad para este tipo de estudios es el calentamiento global, que supone un cambio en los patrones climáticos. Los escenarios de precipitación presentados por Hidalgo *et al.* (2013) para América Central, resaltan la disminución de la precipitación para finales del siglo XXI (2077-2099), sin embargo, se hace la aclaración que para la región Caribe de Costa Rica y Panamá hay incertidumbre, entre otras cosas por la respuesta que puede tener la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe ante el cambio climático.

Los resultados aquí obtenidos son una útil herramienta para empresas dedicadas al sector agropecuario en esta región de Costa Rica, ya que las ayuda en la planificación y toma de decisiones.

### **Agradecimientos**

El estudio se realizó en el marco del proyecto del Centro de Investigaciones Geofísicas, Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica: “Clima, variabilidad y cambio climático en la Vertiente Caribe de Costa Rica: Un estudio básico para la actividad bananera”, a solicitud de la Corporación Bananera Nacional (CORBANA), VI-805-B0-402. Los autores agradecen a Aaron Vega por la digitalización de los datos de las estaciones meteorológicas. También a los proyectos del CIGEFI-UCR: 805- A9-532, B0-065, B3-600, B4-227 y B6-143.

### **Bibliografía**

Alfaro E, Pérez-Briceño PM (2014): Análisis del impacto de fenómenos meteorológicos en Costa Rica, América Central, originados en los mares circundantes. *Revista de Climatología*, 1-11.

Alfaro E, Quesada A (2010): Ocurrencia de ciclones tropicales en el Mar Caribe y sus impactos sobre Centroamérica. *Intersedes*, 11(22), 136-153.

Amador JA, Alfaro EJ, Hidalgo HG, Soley FJ, Solano F, Vargas JL, Sáenz F, Calderón B, Pérez PM, Vargas JJ, Díaz R, Goebel A, Montero A, Rodríguez JL, Salazar A, Ureña P, Mora N, Rivera I, Vega C y Bojorge C (2013): Clima, variabilidad y cambio climático en la Vertiente Caribe de Costa Rica: Un estudio básico para la actividad bananera. Informe Final del Proyecto VI-805-B0-402. Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Vicerrectoría de Investigación y Escuela de Física, Universidad de Costa Rica y Corporación Bananera Nacional (CORBANA), Setiembre 2013, 225 pp.

Bautista F, Bautista D, Delgado-Carranza C (2009): Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications, *Atmósfera* 22:331-348.

Cuadrat JM, Pita MF (1997): *Climatología*. Madrid: Ediciones Cátedra.

Clark I, Harper W (2007): *Practical Geostatistics 2000*. Ohio: Ecosse North America LLC.

Díaz JM (1981): Los litorales de Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1:191-194.

ESRI (2016): Cómo funciona Kriging. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>

Fallas JC, Oviedo R (2003): Capítulo 2: Estaciones meteorológicas. En *Fenómenos atmosféricos y cambio climático, visión centroamericana*. Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía.

FAO (1976): *Riego y Drenaje. Las necesidades de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación, ROMA 1976.

- Fernandez W, Chacon R, Melgarejo J (1996): On the rainfall distribution with altitude over Costa Rica. *Revista Geofísica*, 44: 57-72.
- Hargreaves GH (1981): Responding to tropical climates. The 1980-81 Food and Climate Review, The Food and Climate Forum, Aspen Institute for Humanistic Studies, Boulder, Colo., 29-32.
- Hernández K, Fernández W (2015): Estudio de la evaporación para el cálculo del inicio y la conclusión de la época seca y lluviosa en Costa Rica, *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 14, 18-26, 2015.
- Herrera W (1985): Clima de Costa Rica: Vegetación y clima de Costa Rica (Vol. 2). San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Hidalgo HG (2013): Tendencias hacia condiciones hidrológicas más secas en Centroamérica (1982-2005). *Memorias del VII Congreso de la Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales*, San Carlos, Costa Rica, Nov. 12, 2013.
- Hidalgo HG, Amador JA, Alfaro EJ, Quesada B (2013): Hydrological climate change projections for Central America. *J of Hydrol* 495:94-112. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.004
- Hidalgo H, Alfaro E, Quesada-Montano B (2016): Observed (1970-1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-016-1786-y
- IMN (2013): Descripción del clima: Cantón de Limón. Instituto Meteorológico Nacional.
- Lesdema M (2000): *Climatología y meteorología agrícola*. Madrid: Paraninfo.
- Lu J, Sun G, Amatya DM, McNulty SG (2005): A Comparison of Six Potential Evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *Jour. Amer. Water Resour. Assoc.*, 41, 621-633.
- Maldonado T, Rutgersson A, Alfaro E, Amador J, Claremar B (2016): Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures, *Adv. Geosci.*, 42, 35-50, doi:10.5194/adgeo-42-35-2016.
- Mather JR (1974): *Climatology: Fundamentals and applications*. New York, McGraw-Hill, Inc.
- Miller A (1975): *Climatología*. Barcelona: Omega.
- Sáenz F (2014): El ciclo diario de la precipitación en el Caribe de Costa Rica: observaciones y simulaciones con un modelo dinámico regional. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José.
- Sáenz F, Amador JA (2016): Características del ciclo diario de precipitación en el Caribe de Costa Rica. *Revista de Climatología*, 16: 21-34.
- Solano S, Villalobos R (2005): *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, Ministerio de Ambiente y Energía.
- Thorntwaite CW (1948): An approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Oliver JE (2005): Climate classification. In Oliver, J. E., *Encyclopedia of World Climatology* (pp. 218-226). Gran Bretaña: Springer Dordrecht.
- Vargas G (2006): *Geografía de Costa Rica*. Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José.