

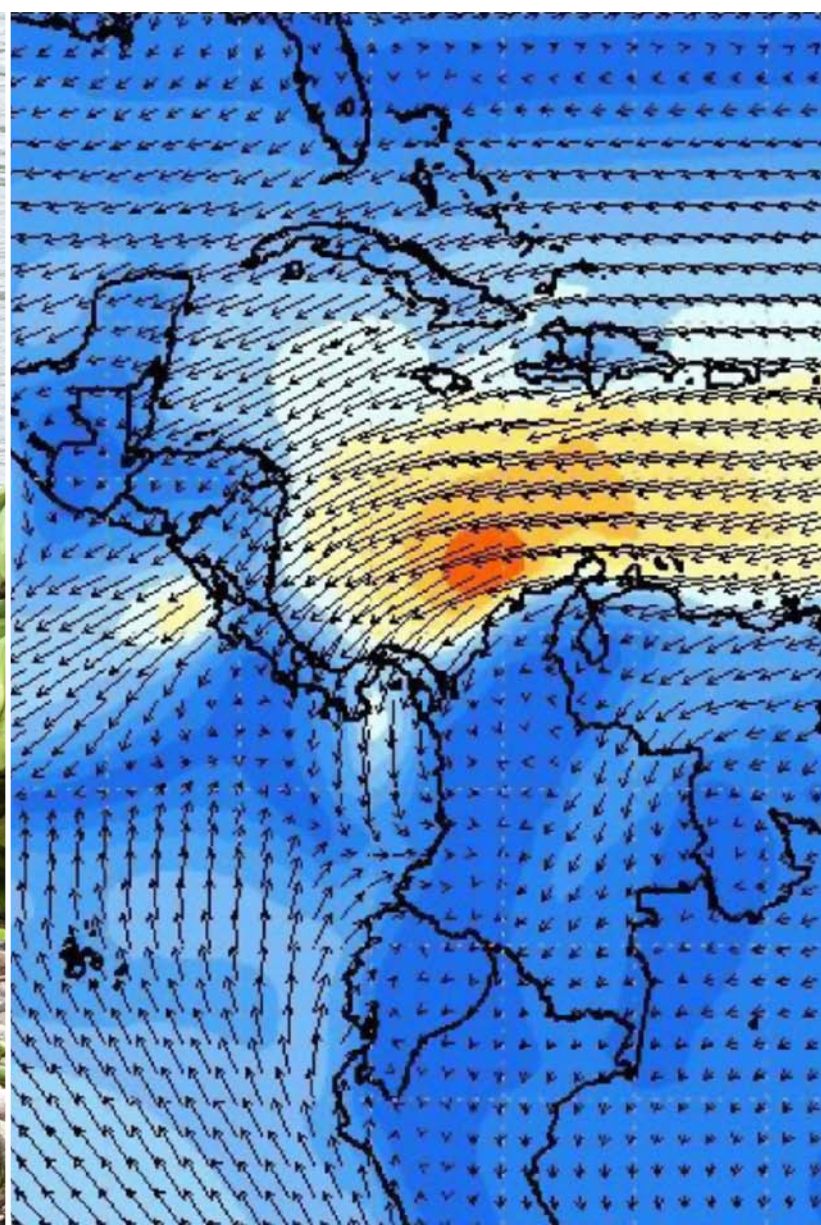
TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS



ISSN 1409 - 2034

Volumen 16

Junio 2017



TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 1409 - 2034

Volumen 16

Junio 2017

Editora:

Dra. Gladys Jiménez Valverde

Director de publicación:

MSc. Roberto Villalobos Flores

Comité editorial:

Lic. Werner Stolz España, MSc. María Esther Suárez Baltodano,
Ing. José Alberto Retana Barrantes, Lic. Luis Fernando Alvarado Gamboa

Diseño y diagramación:

Rodrigo Granados Jiménez

La revista "Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos" es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.

CONTENIDO

Pág. Artículo

- 5 **Influencia de factores climáticos en la producción de banano. Estudio de caso**
JOHNNY MONTENEGRO BALLESTERO
- 15 **Climatology of the low-level winds over the intra-american sea using satellite and reanalysis data**
GABRIELA MORA ROJAS
- 31 **Análisis de incertidumbre utilizando el método de Montecarlo, en la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energía, en el año 2012, en Costa Rica**
KENDAL BLANCO SALAS
- 48 **Adaptación al cambio climático: un proceso de enseñanza-aprendizaje**
JOSE ALBERTO RETANA BARRANTES
- 62 **Propuesta metodológica para la predicción climática estacional del veranillo en la cuenca del río Tempisque en el Pacífico Norte de Costa Rica**
ERIC J. ALFARO MARTÍNEZ y HUGO G. HIDALGO LEÓN

Influencia de factores climáticos en la producción de banano. Estudio de caso.

JOHNNY MONTENEGRO BALLESTERO¹

Resumen

El rendimiento productivo de los cultivos depende además del manejo técnico, de condiciones climáticas adecuadas, siendo la cantidad y distribución de la lluvia de gran importancia lo cual ha empezado a variar como resultado del cambio climático. El presente trabajo se realizó con los objetivos de detectar la influencia de diferentes variables climáticas en la producción de banano, en una finca ubicada en la región Caribe, Costa Rica; determinar si existe relación entre la producción de banano y los diferentes eventos ENOS, y estimar el efecto que podría tener el clima futuro bajo un escenario de cambio climático, en la producción de banano.

Para ello se ubicó una finca en la región Caribe de Costa Rica, donde la información productiva se registrada como peso de racimo en períodos de cuatro semanas (un total de 13 períodos por año), y se analizó un período comprendido entre 1999 y el 2013, para un total de 173 períodos.

La información de las variables climáticas fue obtenida de una estación meteorológica ubicada en la finca, de la cual se obtuvieron los registros de lluvia, temperatura del aire, humedad relativa y radiación, las cuales se agruparon en cinco conglomerados denominados condición climática: seca, ligeramente seca, promedio, ligeramente lluviosa, y lluviosa. La misma información climática se agrupó de acuerdo a los tres eventos ENOS: Niña, Niño y Neutro; de acuerdo con las condiciones imperantes durante el desarrollo de la planta y del racimo de banano. En ambos casos se analizó la producción de banano asociada a las condiciones climáticas mencionadas, así como también al evento ENOS.

Para determinar el efecto que potencialmente podría tener el clima futuro bajo un escenario de cambio climático, se ubicó la finca analizada utilizando los mapas de proyección climática para Costa Rica del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), específicamente para lluvia y temperatura, y se relacionó con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Los resultados mostraron que el peso de racimo relacionado con la lluvia ocurrida durante el período de crecimiento de la planta, fue mayor ($P<0,05$) en la condición climática seca comparado con la condición lluviosa; los mejores rendimientos se lograron cuando la lluvia acumulada durante el período de desarrollo de la planta fue de 1.694 ± 34 mm, mientras que el peso de racimo se redujo significativamente ($P<0,05$) cuando la lluvia promedio supera los 2.900 mm. La disminución detectada se tradujo en una reducción de \$1.413 en el ingreso bruto por cada hectárea en producción.

Con respecto a la influencia del fenómeno ENOS, el peso de racimo fue mayor ($P<0,0016$) cuando el desarrollo de la planta ocurrió bajo la influencia de la Niña comparado con condiciones climáticas típicas del Niño. Esta disminución representa \$1.711 menos en el ingreso bruto de cada hectárea en producción.

De acuerdo con la proyección climática realizada por el IMN, lo más probable que ocurra en la región donde se ubica la finca bananera evaluada, es el incremento en la precipitación. Tomando como base los resultados de la presente investigación y la proyección climática del IMN, se puede inferir que un posible aumento de la precipitación tendría un efecto negativo al reducir los rendimientos de banano. Un incremento de 15% en la precipitación que ocurriría en las próximas décadas, haría que la condición seca se torne lluviosa, lo cual reduciría la producción de banano e implicaría pérdidas económicas muy significativas que pondrían en riesgo la continuidad de esta importante actividad productiva.

PALABRAS CLAVES: VULNERABILIDAD CLIMÁTICA, ENOS, BANANO, PRODUCCIÓN, CAMBIO CLIMÁTICO.

1 Investigador en Cambio climático y Agricultura. Convenio Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Costa Rica. Email: jmontenegro@inta.go.cr

Abstract

Crop productivity depends on technical management, but also of adequate climatic condition. In this sense, the quantity and distribution of the rain has great importance, but because of climate change it begun to vary. Thus, the present research was carried out with the objectives of: to detect the influence of different climatic variables in the banana production, to determine if there is a relationship between banana production and the ENSO event and, to estimate the effect that future climate could have under a climate change scenario on banana production.

The information of climatic variables (rainfall, air temperature, relative humidity and radiation) was obtained from a meteorological station located on the farm, and grouped into five clusters called climatic condition (dry, slightly dry, average, slightly rainy, and rainy). The same climatic information was grouped according to the ENSO events: Niña, Niño, and Neutral, according to the prevailing conditions during the plant and banana bunch development. In both, the banana production was analyzed s function of the climatic condition, as well as the ENSO event. For this reason, production records from 1999 to 2013 from a farm located in the Caribbean region of Costa Rica was utilized. To determine the effect that future climate could potentially have under a climate change scenario there was used the rain and temperature projection maps for Costa Rica, developed by the National Meteorological Institute (IMN).

According to climatic condition, the results showed that the bunch weight was higher ($P < 0.05$) in dry condition compared to rainy condition; the best yield was achieved when the accumulated rainfall during the plant development period was $1,694 \pm 34$ mm, while the bunch weight was significantly reduced ($P < 0.05$) when the average rainfall exceeded 2,900 mm. The decrease detected can be translate into a reduction of \$ 1,413 in gross income per hectare.

Regarding to the influence of the ENSO event, bunch weight was higher ($P < 0.0016$) when the plant development occurred under La Niña influence compared with typical climatic conditions of El Niño. This decrease represents \$ 1,711 less in the gross income per hectare.

According to the climate projection made by the IMN, the most likely to occur in the region where the evaluated banana farm is located is the increase in rainfall. Based on the results of this research and the IMN climate projection, it can be inferred that a possible increase in precipitation would have a negative effect by reducing banana yields. A 15% increase in rainfall that would occur in the coming decades would cause the dry condition to become rainy, which would reduce banana production and that means a very significant economic losses that would jeopardize the continuity of this important productive activity.

KEY WORDS: BANANA PLANTATIONS, CLIMATIC VULNERABILITY, ENOS, PRODUCTIVITY, CLIMATE CHANGE.

1. Introducción

El rendimiento productivo de los cultivos depende del manejo técnico y de las condiciones climáticas, en este sentido, es de gran importancia la cantidad y distribución de lluvia para que las plantas dispongan de adecuada humedad en el suelo para suplir sus necesidades hídricas y con ello, poder expresar su potencial genético productivo. Sin embargo, el comportamiento del clima ha comenzado a variar como resultado de la acumulación de gases con efecto invernadero en la atmósfera, que son los responsables del aumento de la temperatura ambiente y el cambio climático resultante. Esto tiene influencia directa en la producción de los cultivos.

En este sentido, también se debe considerar el efecto que tiene la fase cálida de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en el régimen de precipitación y consecuentemente en la disponibilidad de agua en el suelo. Además, la frecuencia e intensidad de este fenómeno se ha modificado en los últimos años, ya que comparando su comportamiento histórico se ha determinado que se ha vuelto más recurrente (IMN, 2008; 2015).

Estos cambios como son la falta o exceso de lluvias, son atribuidos al cambio climático, y según la opinión de los productores dicha variación afecta directamente los rendimientos agrícolas de manera significativa. Sin embargo, son escasos los trabajos de investigación enfocados en el efecto de las variables climáticas

en los rendimientos históricos de los cultivos (Villalobos, 2001; MINAE, 2014), lo cual ha limitado el conocimiento de su vulnerabilidad al clima y consecuentemente de disponer de una base técnica para desarrollar opciones de adaptación. Particularmente, para el cultivo de banano no fue posible acceder estudios técnicos que muestren la relación del comportamiento histórico de este cultivo con el clima.

De igual forma, existen pocos trabajos que se enfocan en la vulnerabilidad futura, para anticipar el efecto del clima en la producción y con ello, poder desarrollar opciones para su adaptación a las nuevas condiciones climáticas que se prevé imperarán en el futuro. En este sentido Ramírez et al. (2012), mencionan que debido al incremento de la temperatura y la lluvia, en el futuro se producirá la reducción en el rendimiento de este cultivo debido a la disminución del tamaño del racimo y al incremento de los problemas fitosanitarios. Resultados similares relacionados con la reducción del rendimiento se obtuvieron mediante simulación PNUD-CEPAL (2010) y Soto (2012). Otros trabajos se han enfocado más, en el cambio potencial de la ubicación de las áreas apropiadas para la producción de banano para la exportación (Machovina y Feeley, 2013).

En Costa Rica el cultivo de banano es de gran importancia social y económica, por lo cual se hace necesario determinar la vulnerabilidad de este cultivo a las variaciones climáticas, para desarrollar y apoyar de manera directa a los productores con opciones de adaptación, y de esta manera contribuir con la seguridad alimentaria de nuestro país, debido a que este cultivo es fuente de empleo para cientos de trabajadores (CORBANA, 2015), los cuales dependen de esta actividad para poder llevar sustento a sus familias.

Por las razones antes expuestas, el presente trabajo se realizó con los siguientes objetivos: detectar si existe influencia de diferentes variables climáticas en la producción de banano, en una finca ubicada en la región Caribe, Costa Rica;

determinar si existe relación entre la producción de banano y los diferentes eventos del fenómeno ENOS; y estimar el efecto en la producción de banano que podría tener el clima futuro bajo un escenario de cambio climático. Esto con el fin de que se pueda utilizar esta información para desarrollar estrategias que permitan adaptar esta actividad a las nuevas condiciones climáticas.

2. Materiales y métodos

Con el propósito de determinar el efecto de factores climáticos en la producción de banano, se ubicó una finca en la región Caribe de Costa Rica, cantón de Matina, en la zona de vida que corresponde a bosque húmedo tropical (Holdridge, 2005), con una precipitación promedio anual de 3.000 mm y una temperatura media anual y 26°C.

La plantación de banano, con 1.800 plantas ha⁻¹ del clon Gran Enano, se estableció en suelo que se clasifica como Andosol de textura arcillosa, y es fertilizada anualmente con 300, 150 y 200 kg de nitrógeno, fósforo y potasio ha⁻¹ año⁻¹; también se le aplica 1,0 tonelada de CaCO₃ ha⁻¹. Otros agroquímicos que se aplican con regularidad incluyen: fungicidas, nematicidas y herbicidas.

La cosecha es una labor continua y se realiza durante todo el año, sin embargo, debido al manejo dado a la plantación, la información productiva es registrada como peso de racimo en períodos de cuatro semanas (un total de 13 períodos por año). En esta investigación se analizó un período comprendido entre 1999 y el 2013, para un total de 173 períodos.

La información de las variables climáticas fue obtenida de una estación meteorológica ubicada en la finca, de la cual se obtuvieron los registros de lluvia, temperatura del aire, humedad relativa y radiación, a partir del 2003. Los datos climáticos previos a esta fecha fueron proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional y provienen de una estación meteorológica ubicada

aproximadamente a 1,5 km al sureste de la finca evaluada.

Todos los valores de las variables climáticas que se muestran en la sección de resultados, están expresados para el periodo de crecimiento de la planta y el racimo, lo cual tiene una duración de nueve meses.

2.1. Producción relacionada al clima

En esta finca el agua disponible en el suelo para las plantas de banano es suplida exclusivamente por la lluvia, la cual en el Caribe de Costa Rica presenta variaciones importantes a lo largo del año, así como variaciones interanuales (IMN, 2008); otras variables climáticas no presentan variaciones marcadas. Por ello, para analizar el efecto del clima en la producción del banano, se partió del supuesto de que la lluvia es la variable climática que tiene más peso en los rendimientos. En consecuencia, el ordenamiento para el análisis de los datos se realizó con base en esta premisa. De esta forma se caracterizaron las condiciones climáticas, las cuales se definieron en función de la cantidad de lluvia que se presentó durante la fase de crecimiento de la planta y el racimo. Por esta razón, todos los datos de producción y de las variables climáticas se ordenaron de acuerdo con la variable lluvia, la cual se organizó de manera ascendente.

2.1.1 Condición climática

Para este análisis, los datos climáticos y de producción ordenados según se indicó, se agruparon en cinco conglomerados, de esta manera se obtuvieron dos grupos extremos (una condición climática seca y otra lluviosa), así como un grupo central o condición climática promedio, con dos rangos de variación intermedios que se consideraron normales (condición climática ligeramente lluviosa y ligeramente seca).

La producción de banano expresada como peso del racimo y determinada en cada condición

climática, así como los valores de cada variable climática se compararon entre sí utilizando Infostat (DiRienzo et al., 2014), realizándose un análisis de varianza, la diferencia entre medias se determinó de acuerdo con Tukey al nivel de $P < 0,05$.

2.1.2 Valoración económica

Para valorar el potencial impacto económico que puede tener el clima en el rendimiento productivo del cultivo del banano, se comparó la producción cuando el desarrollo del banano ocurre bajo la condición climática lluviosa con respecto a la condición climática seca, se utilizó el precio actual recibido por caja de banano, así como la producción promedio de la finca (2.500 cajas ha^{-1}) de donde procedían los datos de producción.

2.2. Producción y el fenómeno del ENOS

Para este análisis se agrupó la producción del banano en las tres categorías del fenómeno ENOS: La Niña, El Niño y Neutro, de acuerdo con las condiciones imperantes durante el desarrollo de la planta y del racimo de banano. Para realizar esta clasificación se utilizó la información generada por el Instituto Meteorológico Nacional (2015), la cual muestra el historial de estos eventos en el país.

A la producción observada durante los eventos ENOS, se les realizó un análisis de varianza y se compararon los promedios con Tukey ($P < 0,05$) utilizando Infostat (DiRienzo et al., 2014).

2.2.1 Evaluación económica

De igual forma que con las condiciones climáticas, se valoró el potencial impacto económico que ejerce la fase cálida o fría del ENOS en el rendimiento productivo del cultivo de banano. Para ello se comparó la producción cuando el desarrollo del racimo ocurre bajo la influencia de El Niño o de La Niña, y se utilizó el precio actual recibido por caja de banano.

2.3. Producción y condiciones futuras del clima

Para determinar el efecto que potencialmente puede tener el clima futuro bajo un escenario de cambio climático, se utilizaron los mapas generados por el Instituto Meteorológico Nacional (Alvarado et al., 2012), en los cuales se detalla la proyección climática para Costa Rica, específicamente relacionada con lluvia y temperatura de acuerdo con el escenario SRES 2 (A2) del Grupo Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2007).

En los mapas generados, se ubicó mediante la utilización de coordenadas la finca evaluada, a fin de conocer la tendencia climática que se estaría presentado en los próximos años. Con base en lo anterior y en los resultados de los análisis realizados, se estimó el posible efecto que el clima futuro podría tener en el rendimiento de dicho cultivo.

3. Resultados

3.1. Efecto de variables climáticas en la producción de banano

3.1.1 Lluvia

Se determinó que el peso del racimo relacionado con la lluvia ocurrida durante el período de crecimiento de la planta, fue mayor ($P<0,05$) en la condición climática seca comparado con el obtenido durante la condición lluviosa. Las

condiciones climáticas restantes mostraron un peso similar de racimo, sin que se encontraran diferencias entre la condición seca o lluviosa (cuadro 1).

La lluvia acumulada durante el período de crecimiento de la planta, difirió significativamente ($P<0,0001$) entre las distintas condiciones climáticas, con excepción de la condición ligeramente lluviosa. Se encontró que conforme se incrementa la lluvia, el peso de racimo tiende a reducirse, de manera que los mejores rendimientos se lograron cuando la lluvia acumulada durante el período de desarrollo de la planta fue de 1.694 ± 34 mm, mientras que el peso de racimo se redujo significativamente ($P<0,05$) cuando la lluvia promedio superó los 2.900 mm (cuadro 1).

Esta relación puede ser mejor apreciada, cuando se expresa la pérdida de peso del racimo en función de la cantidad adicional de lluvia mensual con respecto a aquella determinada como óptima para la producción de banano, durante el ciclo de crecimiento de la planta.

Se determinó que en promedio cuando la condición climática cambia de seca a lluviosa, la reducción del peso fue de aproximadamente 1,7 kg racimo⁻¹ (figura 1).

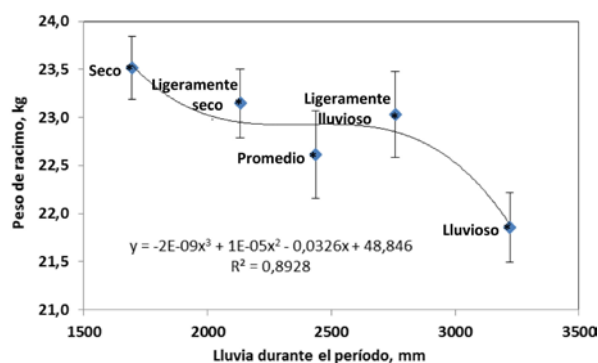
El análisis mostró que los mejores rendimientos de banano se lograron cuando en promedio este cultivo recibió 188 mm mes⁻¹, lo cual es

Cuadro 1. Influencia de la lluvia (mm) según condición climática en el peso de racimo (kg), en una plantación de banano. Región Caribe, Costa Rica. 2015.

Condición climática	Peso de racimo*, kg	Lluvia, rango observado mm**	Lluvia acumulada, mm**
Seca	23,5 $\pm$ 0,3 ^a	1.180 – 1.997	1.694 $\pm$ 34 ^a
Ligeramente seca	23,1 $\pm$ 0,4 ^{ab}	2.010 – 2.274	2.132 $\pm$ 12 ^b
Promedio	22,6 $\pm$ 0,5 ^{ab}	2.283 – 2.640	2.437 $\pm$ 15 ^c
Ligeramente lluviosa	23,0 $\pm$ 0,4 ^{ab}	2.647 – 2.889	2.758 $\pm$ 13 ^d
Lluviosa	21,9 $\pm$ 0,4 ^b	2.901 – 4.024	3.221 $\pm$ 52 ^e

* Promedios $\pm$ 1 EE con diferente letra difieren al nivel de $P<0,05$.

** Durante el período de crecimiento (9 meses).



* Condición climática; promedios ± 1 EE

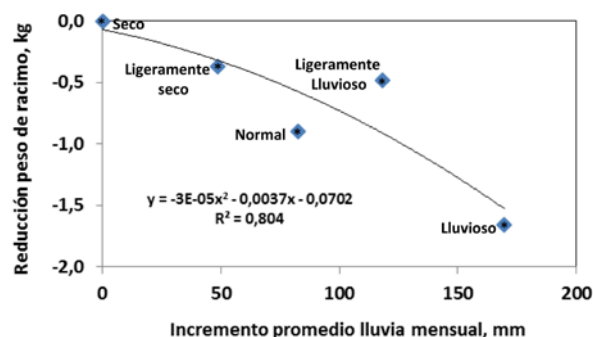
Figura 1. Efecto de la precipitación (mm), en el peso de racimo (kg). Región Caribe, Costa Rica. 2015.

congruente con lo recomendado para este cultivo en relación a las necesidades hídricas (Calberto et al., 2015).

También se determinó correlación ($P < 0,01$) negativa ($r = -0,19$) entre estas dos variables, así como tendencia polinomial negativa (figura 2).

De acuerdo con este análisis, los meses donde la precipitación es de moderada a baja, es cuando se presentan las mejores condiciones para la producción bananera en esta finca. Sin embargo, es precisamente durante la condición de clima seco que en ocasiones las plantas de banano muestran signos de estrés hídrico. Ello probablemente se produce debido a que los canales de drenaje, construidos para eliminar el exceso de humedad del suelo que resulta de las grandes precipitaciones durante la época lluviosa, también reducen la humedad del suelo cuando las lluvias no son muy abundantes.

Lo anterior indica, que posiblemente habría que modificar el manejo de los drenajes durante épocas de baja precipitación donde las plantas muestran signos de déficit hídrico, tiempo para el cual habría que diseñar alguna forma de mantener la humedad del suelo y donde el riego podría ser una opción a considerar.



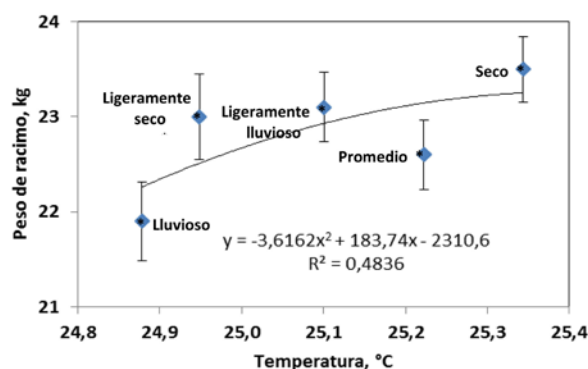
* Condición climática

Figura 2. Reducción del peso de racimo (kg), con el incremento de la lluvia mensual (mm), en una finca bananera. Región Caribe, Costa Rica. 2015.

3.1.2 Temperatura

En el periodo comprendido en la investigación, la temperatura promedio mensual fluctuó entre los 24,5°C y los 26°C; los menores valores se presentaron a finales y principios de año, y los mayores entre mayo y octubre.

Con respecto a la relación de esta variable con la producción, no hubo correlación estadística, aunque la temperatura presentó tendencia estimular la producción, ya que se observó que conforme se pasa de la condición climática Lluviosa a la seca, lo cual correspondió a un incremento promedio de aproximadamente 0,5 °C, se observó mayor peso de racimo (figura 3).



* Condición climática; promedios ± 1 EE

Figura 3. Efecto de la temperatura, °C, en el peso de racimo (kg), en una finca bananera. Región Caribe, Costa Rica. 2015.

3.2. Evaluación económica

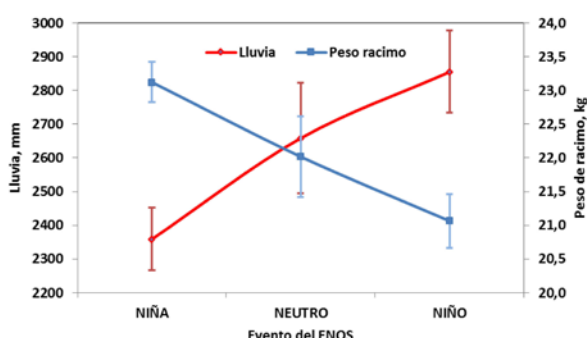
De acuerdo con la información analizada, la reducción en el peso de racimo durante la condición climática lluviosa, representa un 7,4% de la lograda durante la época seca. Considerando la productividad promedio de la finca, que es de 2.500 cajas ha⁻¹ año⁻¹, la disminución detectada representa aproximadamente 184 cajas, lo cual se traduce en una reducción de \$1.413 en el ingreso bruto por cada hectárea en producción.

3.3. Influencia del fenómeno ENOS en la producción

De acuerdo con el indicador mensual de ENOS (IMN, 2015), se determinó que en el caso de La Niña estuvo presente en 31 periodos de cosecha, El Niño en 18; y el Neutro en 10.

Se determinó, que el peso del racimo es influenciado directamente por la cantidad de lluvia ocurrida durante el evento ENOS, en la cual se desarrolló la planta y el racimo, mostrando que existe una relación inversa entre esta y el nivel productivo (figura 4).

En cuanto al peso de racimo, este fue mayor ($P < 0,0016$) cuando el desarrollo de la planta ocurrió bajo la influencia de La Niña comparado



Promedios ± 1 EE

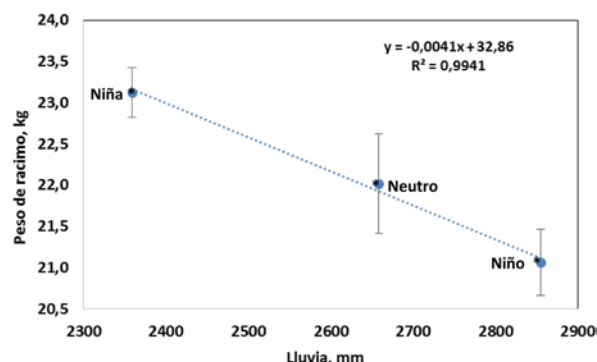
Figura 4. Efecto de evento ENOS en el peso de racimo en una finca bananera. Región Caribe, Costa Rica. 2015.

con las condiciones climáticas típicas de El Niño (figura 4), determinándose una correlación negativa ($r = -0,24$; $P < 0,0015$) entre estas dos variables.

Esto demuestra, que la producción del banano se relaciona directamente con la cantidad de lluvia recibida por el cultivo, ya que la menor cantidad de lluvia acumulada se presentó durante La Niña (figuras 4 y 5), donde se determinó la mayor producción. El menor rendimiento y la mayor cantidad de lluvia acumulada se detectó durante eventos El Niño; mientras que la producción en eventos Neutro no difirió de aquella obtenida bajo la influencia de El Niño o La Niña (figura 4).

Estos resultados son coincidentes con los obtenidos en el anterior análisis de condiciones climáticas, el cual mostró que el mayor peso de racimo se presentó cuando las lluvias fueron moderadas o bajas (cuadro 1). En consecuencia, se demuestra que en la finca evaluada las condiciones de alta pluviosidad son un factor que se asocia de manera directa y negativa con los rendimientos productivos del banano.

Además, al considerar las restantes variables climáticas exceptuando la lluvia (cuadro 2), se puede observar que durante los eventos de La Niña se lograron los mejores rendimientos productivos



* Evento ENOS, promedio ± 1 EE

Figura 5. Cantidad de lluvia y peso de racimo, según evento ENOS en una finca bananera. Región Caribe, Costa Rica. 2014.

Cuadro 2. Valores promedio para diferentes variables climáticas, según evento ENOS, en una plantación de banano. Región Caribe, Costa Rica. 2014.

Evento ENOS	Humedad relativa, %	Radiación, W m ⁻²	Temperatura, °C	Viento, m s ⁻¹	Lluvia, mm
Niña	90,6±0,4 ^b	267±6 ^a	25,0±0,1 ^b	1,48±0,06 ^a	2359±93 ^a
Neutro	87,1±0,6 ^a	314±11 ^b	24,8±0,1 ^a	1,81±0,12 ^b	2658±164 ^{ab}
Niño	89,0±0,5 ^b	279±9 ^a	25,2±0,1 ^{ab}	1,37±0,10 ^a	2855±122 ^b

Promedios ± 1 EE con diferente letra difieren al nivel de P<0,05.

(figura 4), los valores de las restantes variables climáticas consideradas, fueron similares a los registrados durante los eventos de El Niño (cuadro 2), cuando la producción fue menor (figura 4).

Lo anterior indica, que los promedios de estas variables climáticas no cambian significativamente en estos eventos y por lo tanto no influyen en los rendimientos productivos. A pesar del hecho que durante los eventos Neutro las variables climáticas mostraron ser diferentes con respecto a eventos El Niño o La Niña, esto no se reflejó en los rendimientos productivos (figura 4).

3.3.1 Evaluación económica

La reducción promedio en el peso del racimo determinada durante los eventos Niño, con respecto a la observada durante La Niña, fue de 2,1 kg, lo cual expresado en términos porcentuales es de un 8,9%. Considerando que esta finca tiene una productividad promedio de 2.500 cajas ha⁻¹ año⁻¹, la disminución detectada representa 222 cajas, lo cual significa \$1.711 menos en el ingreso bruto de cada hectárea en producción.

3.4. Vulnerabilidad climática futura

De acuerdo con la proyección climática realizada por el IMN (Alvarado et al. 2012), lo más probable que ocurra en la región donde se ubica la finca bananera evaluada, es el incremento en la precipitación pluvial. Los análisis realizados en las secciones anteriores, muestran que conforme se

incrementa la precipitación disminuye el peso de racimo.

Con relación a la variable temperatura, la proyección climática muestra que ésta también aumentará (IMN, 2008), en tanto que el análisis de la condición climática reveló que conforme ésta se incrementó moderadamente, también lo hizo el peso del racimo. Sin embargo, considerando que el banano tiene un rango de temperatura entre los 18,5°C y hasta 35,5°C (Anacafé, 2004), el incremento de temperatura no estaría afectando negativamente el desarrollo de esta actividad.

Basado en lo anterior y en la proyección climática del IMN, se puede inferir que el posible aumento de la precipitación tendría efecto negativo al reducir los rendimientos de banano en esta finca. Un incremento de un 15% en la precipitación pluvial que se prevé ocurriría en las próximas décadas, haría que la condición seca se torne en lluviosa, lo cual reduciría la producción de banano y tal como se demostró con las anteriores valoraciones económicas (secciones 3.2, 3.3.1), esto implicaría pérdidas económicas muy significativas que pondrían en riesgo la continuidad de esta importante actividad productiva.

4. Discusión

La cantidad de lluvia caída tiene influencia directa en la producción, tal y como lo demostraron los análisis realizados de condición climática y del fenómeno ENOS (figuras 1, 2 y 4). Los mejores rendimientos se lograron cuando la

lluvia se aproxima a la cantidad requerida por el cultivo (figuras 1 y 4), cantidad que ha sido mencionada en distintos estudios (Basso et al., 2004; Calberto et al., 2015), y que es similar a la estimada en la presente investigación durante la condición climática seca y en los eventos La Niña. Sin embargo, la región donde se ubica la finca históricamente recibe lluvia en cantidades que superan el óptimo para la producción de este cultivo, lo cual se refleja en los rendimientos productivos tal como se ha demostrado en la presente evaluación.

Adicionalmente, se debe considerar el incremento experimentado en la frecuencia de ocurrencia del fenómeno El Niño en los últimos años (IMN, 2008; 2015), el cual trae un aumento de la cantidad de lluvia en la región donde se ubica la finca analizada, que ha mostrado ser negativo para la producción de este cultivo (figura 5), tendencia que probablemente continuara en el futuro, razón por la cual se hace necesario considerar alternativas de manejo del cultivo para alcanzar niveles de producción económicamente aceptables en el futuro cercano.

En consecuencia, analizando la proyección climática se puede inferir que las condiciones futuras no favorecerán este cultivo con el actual manejo y tipo de variedad o clon utilizado, lo que coincide con los resultados de otros investigadores (Ramírez et al., 2012 y Soto, 2012). En este sentido, para garantizar la continuidad de las fincas bananeras y con ello la estabilidad socioeconómica de la población dependiente de esta actividad, es que se requiere realizar más estudios de investigación, que conlleven a la realización de los cambios necesarios que garanticen la adaptación del cultivo a las condiciones futuras de clima.

Acciones en la infraestructura relacionada directamente con la actividad bananera, tal como la construcción de diques para reducir el riesgo de las inundaciones, la utilización de la distancia correcta entre canales primarios y secundarios

para el drenaje del exceso de humedad y reducir con ello las condiciones de anoxia para las raíces durante la época de mayor precipitación, son algunas de las opciones que se podrían implementar.

Además, la búsqueda de nuevos materiales genéticos adaptados a las nuevas condiciones climáticas es un reto que debe revolve con rapidez, para asegurar la continuidad productiva económica y sostenida de este cultivo, sin olvidar el manejo fitosanitario para contrarrestar el incremento potencial de enfermedades y plagas, así como la utilización de nuevas estrategias de comercialización.

5. Conclusiones

Basado en los resultados de los análisis efectuados se puede concluir que:

- Existe influencia directa de la lluvia en los rendimientos de este cultivo, ya que conforme se incrementa la cantidad de lluvia se reduce el peso de racimo.
- Existe mayor probabilidad de obtener mejor rendimiento productivo durante una fase de La Niña, comparado con eventos de El Niño.
- De acuerdo con la proyección climática del IMN las condiciones futuras no serían las mejores para este cultivo, ya que se incrementarían las lluvias lo cual según se determinó tendría un efecto negativo en los rendimientos de este cultivo.

6. Literatura citada

Alvarado, L.; Contreras, W.; Alfaro, M. y Jiménez, E. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*. IMN-MINAE/PNUD. 1060 p.

- Anacafé. (2004). *Cultivo de banano*. Recuperado de: <http://portal.anacafe.org/Portal/Documents/Documents/2004-12/33/6/Cultivo%20de%20Banano.pdf>
- Basso, L. H.; De Castro-Teixeira, A. H.; Pinheiro, J. M.; Moura, J. A.; Gomes, E. E.; Carvalho, C. M. & Sediya, G. Ch. (2004). Guidelines for irrigation scheduling of banana crop in Sao Francisco Valley, Brazil. II- Water consumption, crop coefficient and physiological behavior. *Rev. Bra. Frutic.* 26(3):464-467
- Calberto, G.; Staver, C. & Siles, P. (2015). *An assessment of global banana production and suitability under climate change scenarios*. In Climate Change and Food Systems: Global assessments and implications for food security and trade. Aziz Elbehri (ed). 345 p.
- Di Rienzo, J.; Casanoves, F.; Balzarini, M.; Gonzalez, L.; Tablada, M. y Robledo, C. (2015). *Infostat*. Universidad Nacional de Córdoba.
- Holdridge, L. (2005). *Mapa de zonas de vida*. Recuperado de: <http://www.cct.or.cr/mapas/zonas-de-vida-costa-rica.pdf>
- IPCC. (2007). *Cambio climático: Informe de síntesis*. 103 p.
- IMN. (2008). *Clima, variabilidad climática y cambio climático en Costa Rica*. Segunda Comunicación Nacional. MINAE. 75 p.
- IMN. (2015). *El fenómeno ENOS*. Recuperado de: <http://www.imn.ac.cr/educacion/enos.html>
- Machovina, B. & Feeley, K. (2013). Climate change driven shifts in the extent and location of areas suitable for export banana production. *Ecological Economics* 95:83-95.
- MINAE. (2014). *Tercera Comunicación Nacional. Seguridad alimentaria y el cambio climático en Costa Rica: Granos básicos*. 96 p.
- PNUD-CEPAL. (2010). *Panamá: Efectos del cambio climático sobre la agricultura*. Recuperado de: http://smye.info/gia-mexico/wp-content/uploads/2010/07/Panama_-_cambio_climatico.pdf
- Ramírez, J.; Jarvis, A. y Staver, C. (2012). *Cambio climático y agricultura: impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Recuperado de : <file:///C:/Cambio%20climatico,%20impactos,%20vulnerabilidad,%20adaptacion%20Apartado%20Julio%202011.%20J.%20Ramirez.pdf>
- Retana, J. y Villalobos, R. (2000). Caracterización pluviométrica de la fase cálida de ENOS en Costa Rica con base en probabilidades de ocurrencia de eventos en tres escenarios: seco, normal y lluvioso. *Tópicos meteorológicos y Oceanográficos* 7(2):124-131.
- Retana, J.; Alvarado, L. y Pacheco, R. (2009). *Relación entre la variabilidad climática y el ciclo agrícola del frijol en la Región Huetar Norte de Costa Rica*. Perspectivas del clima para el ciclo 2009-2010. IMN. Nota Técnica 03. San José, Costa Rica. 9 p.
- Soto, M. (2012). *Implicaciones del cambio climático para el cultivo del banano*. Recuperado de: http://www.aebe.com.ec/data/files/DocumentosPDF/IX%20Foro%20Internacional%20Banano/Mar29_PRESENTACION-1.pdf
- Villalobos, R. (2001). Impacto del fenómeno “El Niño” sobre la producción de arroz y frijol en dos regiones agrícolas de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos* 8(1):19-25.

Climatology of the low-level winds over the intra-american sea using satellite and reanalysis data

GABRIELA MORA ROJAS¹

Abstract

The climatologies of five tropical low-level jets are studied through QuikScat, CCMP, ERA-Interim, and NCEP-DOE data. Three of the jets —the Tehuantepec jet, the Papagayo jet, and the Panama jet— are associated with topographic gaps in Central America. The other two jets —the Caribbean low-level jet (CLLJ) and the Choco jet— seem to be associated with the strengthening of NASH and a temperature gradient between ocean and continent, correspondingly. The climatological analysis of the five jets shows similar annual cycles at the surface, except for the CLLJ, which has two maxima, one during summer and during winter.

At surface level, the CCMP data shows a stronger CLLJ during winter than in summer, although QuikScat shows a summer CLLJ almost as strong as the winter jet, while surface data from ERA-Interim and NCEP-DOE reanalyses show a stronger summer CLLJ. The CLLJ, the Choco jet, and the Panama jet transport moisture to continental areas, unlike the Papagayo and Tehuantepec jets, which exit significant topographic gaps and generate a wind stress curl that excites Ekman pumping and upwelling in the underlying ocean. The upwelling caused by the Papagayo jet aids in the generation of the Costa Rica Dome (i.e. shoaling of the thermocline), which produces a hole in ITCZ precipitation.

KEYWORDS: CLLJ, NASH, JET.

Resumen

La climatología de cinco chorros tropicales de bajo nivel se estudia a través de datos de QuikScat, CCMP, ERA-Interim y NCEP-DOE. Tres de los chorros o “jets”—el Tehuantepec, Papagayo y Panamá—, están asociados a brechas topográficas en Centro América. Los otros dos chorros —el del Caribe y el Chocó—, parecen estar asociados con el fortalecimiento de NASH y un gradiente de temperatura entre el océano y el continente, correspondientemente. El análisis climatológico de los cinco chorros muestra ciclos anuales similares en superficie, excepto el CLLJ, el cual tiene dos máximos, uno durante el verano y el otro durante el invierno.

A nivel superficial, los datos del CCMP muestran un CLLJ más fuerte durante el invierno que el verano, aunque QuikScat muestra un CLLJ en verano que es casi tan intenso como el del invierno, mientras que los datos de reanálisis ERA-Interim y NCEP-DOE muestran un CLLJ más intenso en el verano. Los jets CLLJ, Chocó y Panamá transportan humedad a áreas continentales, contrario a lo que sucede con el jet de Papagayo y el de Tehuantepec, los cuales salen de brechas topográficas significativas y generan un rotor en el estrés de viento que estimula el bombeo de Ekman y por lo tanto la surgencia en la parte superficial del océano. La surgencia generada por el jet de Papagayo contribuye a la generación del Domo de Costa Rica (i.e., posicionamiento de la termoclina a niveles superficiales), lo cual produce un agujero en la precipitación asociada a la ITCZ.

PALABRAS CLAVE: CLLJ, NASH, JET.

1 Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, E-mail: gabriela.morarojas@ucr.ac.cr

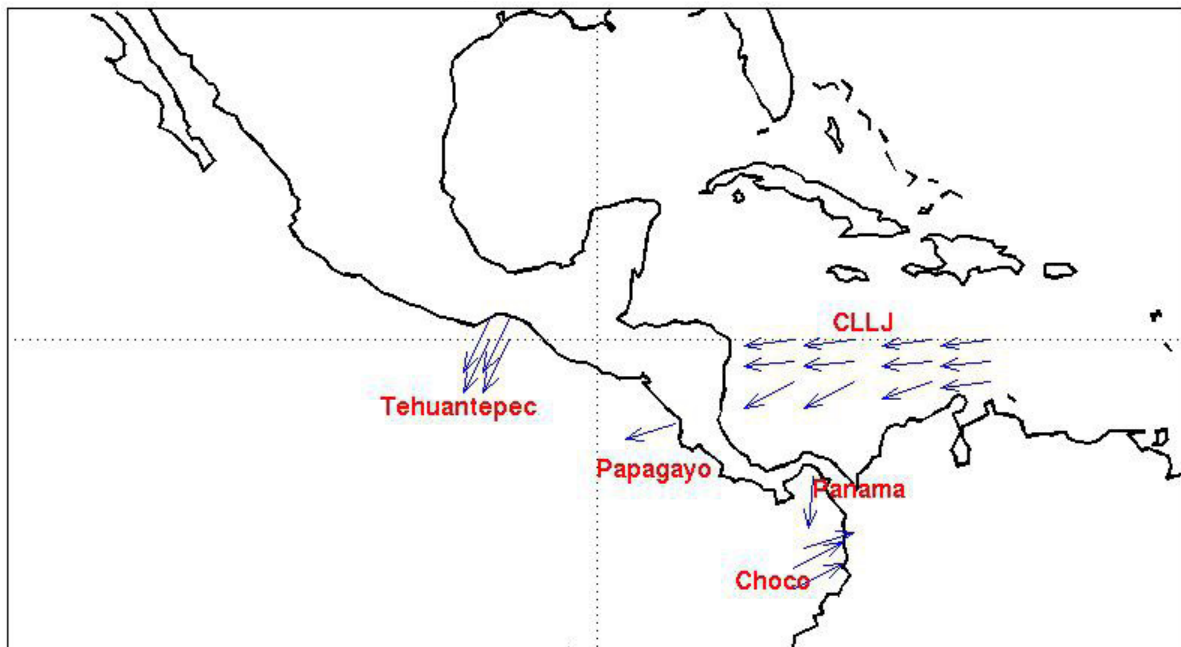


Figure 1. Tropical Low Level Jets, schematic view.

1. Introduction: Climatological Review

Sustained high speed wind streams, that last months, are often called “jets”. Some of these jets are regarded as large scale low-level jets, while others are known as “gap jets”, as these are strong winds developed after passing topographic gaps. This section discusses the five most important jets influencing the tropical portion of the American continent, which are shown in figure 1.

1.1. Large scale low-level jets: Caribbean Low Level Jet and Choco Jet

A strong easterly wind current in the Caribbean develops during the boreal summer and reaches its maximum magnitude at 925 mb in July. This current, known as the Caribbean Low Level Jet (CLLJ), was first studied by Amador (1998) who used data from the NCEP/NCAR Reanalysis project (Kalnay et al. 1996) for the boreal summers of 1982 to 1994. Amador (1998), found an interesting climatic characteristic in the tropical region of the

American continent: an intense wind current at low levels of the tropical atmosphere, especially at 925, 850 and 700 mb, with mean winds of 15 m s^{-1} (Trasviña & Amador, 2005). This wind current has been known since then as the Caribbean Low Level Jet (CLLJ), but in recent studies it has received another name, the Intra-Americas Low-Level Jet (IALJ). The CLLJ is barotropically unstable and centered between 13.0° and 15.0°N and between 70.0° and 80.0°W (Amador, 1998; Amador & Magaña 1999; Amador, Magaña & Pérez, 2000). During the boreal summer, when the jet is active, the humidity from the Caribbean is pushed westward and converges at the Caribbean coast between Nicaragua and Costa Rica, producing strong precipitation over the east coasts of these countries and no precipitation at all over the Caribbean Sea. The influence of this jet extends into the north Pacific, east of 120.0°W , producing mesoscale eddies that affect the circulation in the area (Amador, Alfaro, Lizano & Magaña, 2006).

Research done by Wang and Lee (2007) shows that the CLLJ forms when the North Atlantic Subtropical High (NASH) is strong and displaced

to the west, creating a pressure gradient that accelerates the easterly winds in the Caribbean.

As the NASH extends westward and retreats eastward during the year, the CLLJ has a semiannual variability: two maxima in the summer and winter, and two minima in the spring and fall, directly associated with the NASH displacement.

The strength of the CLLJ varies with the phase of ENSO (Mora & Amador, 2000), having a stronger easterly component (1 m s^{-1} negative anomaly) during the warm phase (El Niño) and weaker easterly component (1.5 m s^{-1} positive anomaly) during the cold phase (La Niña).

In regard to the Chocó jet, special attention has been given to it on the Pacific coast of Colombia (Poveda & Mesa, 1999, 2000; Poveda, 2004); a tropical low level jet between 1000 and 900 mb, which transports large amounts of moisture from the Pacific Ocean to this part of the continent. Its intensity decreases during El Niño and intensifies during La Niña, affecting the hydroclimatology of western and central Colombia. Moreover, the rain over the Andes in Colombia affects the precipitation over the Pacific Ocean near the Colombian coast, as a feedback mechanism. According to research done by Poveda (2004), the precipitation over the Colombian coast is between 8000 and 13000 mm/year, which ranks as one of the rainiest places in the world. The low-level (800-1000 mb) westerly moisture advection is stronger during September – November. A detailed climatology of rainfall in this region and numerical model simulations are described in recent articles by Mapes, Warner, Xu and Negri (2003a), Warner, Mapes and Xu (2003) and Mapes, Warner and Xu (2003b). The authors note that the extreme annual rainfall in this region is because the seasonal march of rainfall has a northwest-southeast axis, with western Colombia near its center.

The Choco jet energy has been explained by Poveda (2004) as the result of the Pacific sea

surface temperature gradient (Xie, 1998; Yu & Mechoso, 1999; Yin & Albrecht, 2000; Wallace, Mitchell & Deser, 1989); a gradient explained by the Pacific cold tongue located on the west coast of Ecuador and Peru, and the warm temperature from continental west Colombia. The Pacific cold tongue can be explained by wind-driven Ekman transport and can be found from July to November during average years (Amador et al., 2006; Chelton, et al., 2001).

As already said, the Choco jet has its maximum wind speed during September – November, with values between $6\text{--}8 \text{ m s}^{-1}$, whereas it is weaker during February-March, and it interacts with the topography and the trade winds (Poveda & Mesa, 2000). Calculating the surface air temperature anomalies between continental Colombia and the Niño 1+2 area, Poveda and Mesa (2000) found that the gradient is strongest around October and November, which is consistent with the time of maximum activity of the Choco jet. Therefore, according to these results, the strength of the Choco jet may be linked to the temperature gradient between land and ocean. This also explains the deficit of precipitation during El Niño years, because the jet is weaker when the Niño 1+2 area is warmer.

1.2. Gap Jets: Tehuantepec, Papagayo and Panama Jets

There are regions of Central America and Mexico where the topography allows the strong easterlies from the Caribbean to cross the continent and reach the Pacific. These regions often referred to as “gaps,” have been studied by several authors (Xie, Xu, Kessler & Nonaka, 2005; Umatani & Yamagata, 1991; Fiedler, 2002). Strong winds coming from these gaps generate the Tehuantepec, Papagayo and Panama jets, with average magnitudes of approximately 10 m s^{-1} during the boreal winter. The direction of the Tehuantepec and Panama jets

is southward, while the direction of the Papagayo jet varies between west and south-westward.

The Tehuantepec jet is strongest during October-February, which has been explained as a product of the high pressure in the Gulf of Mexico associated with cold fronts from North America, triggering the acceleration of winds through this gap and producing the Tehuantepec Jet (Chelton, Freilich & Esbensen, 2000).

The Papagayo and Panama jets are strongest during December-April and, as well as with the Tehuantepec jet, have been associated with cold front mechanisms. However, Chelton et al. (2000) showed through statistical analysis, that this hypothesis is incorrect, since the correlation analysis between the Pacific trade winds and the Caribbean trade winds is stronger, showing that the Panama jet is more related to northerly winds over the southern Caribbean sea while the Papagayo jet is related to winds with easterly component over the southern Caribbean sea. The same studies show how the Tehuantepec and Panama jets turn anticyclonically toward the west, which is consistent with jets that are inertially balanced at the coast and become more geostrophically balanced with distance away from the coast. The Papagayo Jet does not have this anticyclonic turn, which leads the authors to suggest that the winds are geostrophically balanced through the Papagayo gap.

The Tehuantepec and Papagayo jets show a second maximum during July-August. According to Xie et al. (2005), this behavior could be related to the mid summer drought. The Panama jet disappears after April, while the other jets stay active but weaker, until September, when the Papagayo jet vanishes. In the previously mentioned studies about gap flows, it has been shown that the ITCZ and the jets interact, with the strong jets inhibiting precipitation when the ITCZ migrates close to them.

As the low level jets mentioned in this introductory section play an important role in the tropical dynamics, sometimes inhibiting or enhancing convection, the present study seeks to understand their climatology.

2. Data and methodology

A database has been constructed to compute and display information about the sea surface winds and their vertical profile. The surface wind data used to construct the monthly plots, has been obtained from the CCMP analysis (Cross-Calibrated Multi-Platform), extracting a period from 1990 to 2011 (Atlas et al, 2011). This database has a spatial resolution of 0.25° , and combines cross-calibrated satellite surface winds, derived from microwave radiometers and scatterometers. The other source of surface wind data taken into account on this study is QuikScat (Perry, 2001), with a time resolution of 12 hours, however the monthly mean is calculated to build the database, which includes data from 2000 to 2007. It has a spatial resolution of 0.25° , and rain-flagged wind vectors have been removed.

To study the vertical variation of the wind in the jet areas, particularly the low levels of the atmosphere, data from the NCEP-DOE (Kanamitsu et al, 2002) (Reanalysis 2) and ERA-Interim reanalyses (Dee et al, 2011) were used, computing the long term monthly mean of the zonal, meridional and total wind. The resolution of the NCEP data is $2.50^\circ \times 2.50^\circ$, with 17 significant levels in the vertical component. The spatial resolution from the ERA-Interim data is approximately 80 km, with 60 vertical levels and monthly means from 1979 until 2014. Nomenclature such as WinterU means zonal component during winter and WinterV is the meridional component. The same components are plotted for the other seasons.

Table 1 shows the geographic point locations used to determine the vertical profile of each jet. The

core of the Caribbean low-level jet is observed in different latitudes and longitudes, according to the season, this is why more than one latitude and longitude are shown in table 1, and they will be presented in section 3.1.a.

Table 1. Geographic point locations for calculating the vertical profile of the low-level jets

Jet	Figure #	Latitude	Longitude
Caribbean	4a and 4b	15.0 N	75.0 W
	*4c	*12.0 N	*75.0 W
	*4d	*13.0 N	*75.0 W
	*4e	*12.5 N	*74.5 W
Tehuantepec	5a and 5b	15 N	95.0 W
Papagayo	6a and 6b	11.0 N	86.0 W
Panama	7a and 7b	8.0 N	79.0 W
Choco	8a and 8b	5.0 N	78.0 W

In the following section, plots of the different fields are presented, along with discussions of the various meteorological phenomena they reveal.

3. Results

3.1. Winds

The QuikScat and CCMP monthly mean values of surface winds are shown in figures 2 and 3. The vertical profiles of the five jets are shown in figures 4 to 8 computed with data from the NCEP-DOE and ERA-Interim monthly reanalyses, with the letter *U* indicating the zonal component (dotted lines) and *V* the meridional component (dashed lines). The magnitude of the wind is shown in solid lines.

3.1.1 Caribbean Low Level Jet

As shown in the monthly means from the QuikScat and CCMP data (Figs. 2 and 3), strong northeasterly surface winds occur in the Caribbean during January, February and March (JFM). The surface flow in June, July and August (JJA) is fairly strong over a large fraction of the Caribbean, but is

weaker than the trade flow in JFM. Notice that, according to literature mentioned in section 1.1, the CLLJ peaks in June and July, with a strong easterly component between 9 and 11 $m s^{-1}$. However, figures 2 and 3 correspond to surface data, and the CLLJ is mostly defined as a strong current centered between 925 and 850mb.

The total wind vertical profile (solid lines) over 15.0° N, 75.0° W, shown in figures 4a and 4b, reveals that the CLLJ main peak occurs during summer at approximately 925 mb, with an average speed of 13 $m s^{-1}$. This result agrees with previous studies, displaying strong jet-like behavior on low levels of the atmosphere.

A second peak at this vertical level is found during winter, with an average speed between 11 and 12 $m s^{-1}$, followed by smaller but still strong values during spring and fall. The vertical variation of the zonal wind (dotted lines) explains most of the features of the total wind. The strongest component of the meridional wind is observed during winter at 1000 mb, with an average value between -2 and -3 $m s^{-1}$, corresponding to the northerly component of the CLLJ. The rest of the year is characterized by weak northerly winds. During winter, the jet core (925 mb) displays northerly winds due to the proximity of NASH as well as the cold fronts from the Northern Hemisphere moving southward toward the equator, while during summer months, this jet has a small southerly component; however this one is weaker than the zonal component. After the meridional wind reaches a peak in the southerlies at 850 mb, it remains constant with height between that level and 700 mb.

Observing figures 2 and 3, it is noticeable how the strongest easterly winds in the Caribbean are not exactly located at 15.0° N and 75.0° W, nor is the horizontal size of the jet core the same for summer and winter; the summer jet core covers a bigger horizontal area in the southwestern Caribbean Sea, while the winter jet is smaller and

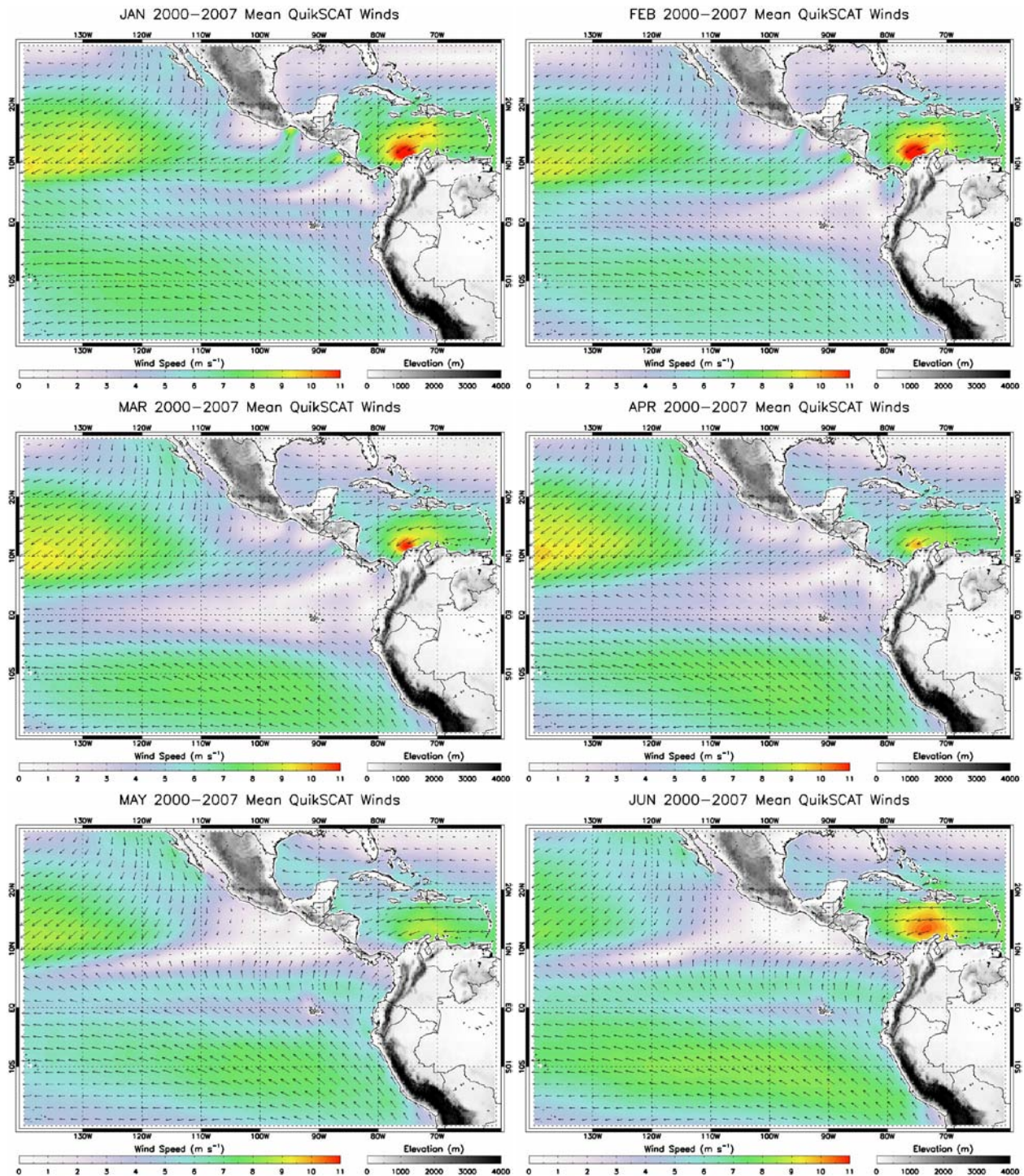


Figure 2a. Surface winds, QuikScat.

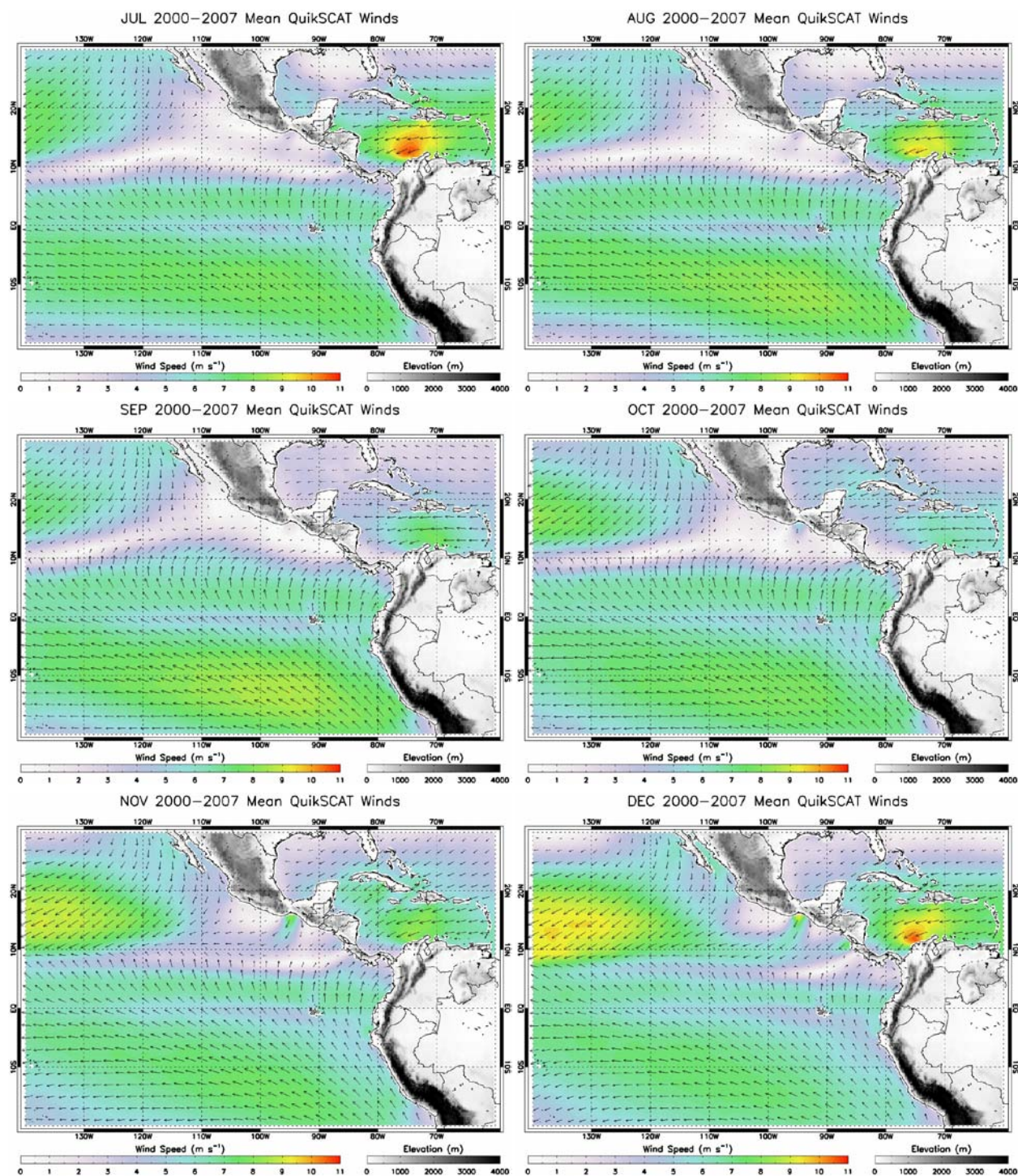


Figure 2b. Surface winds, QuikScat.

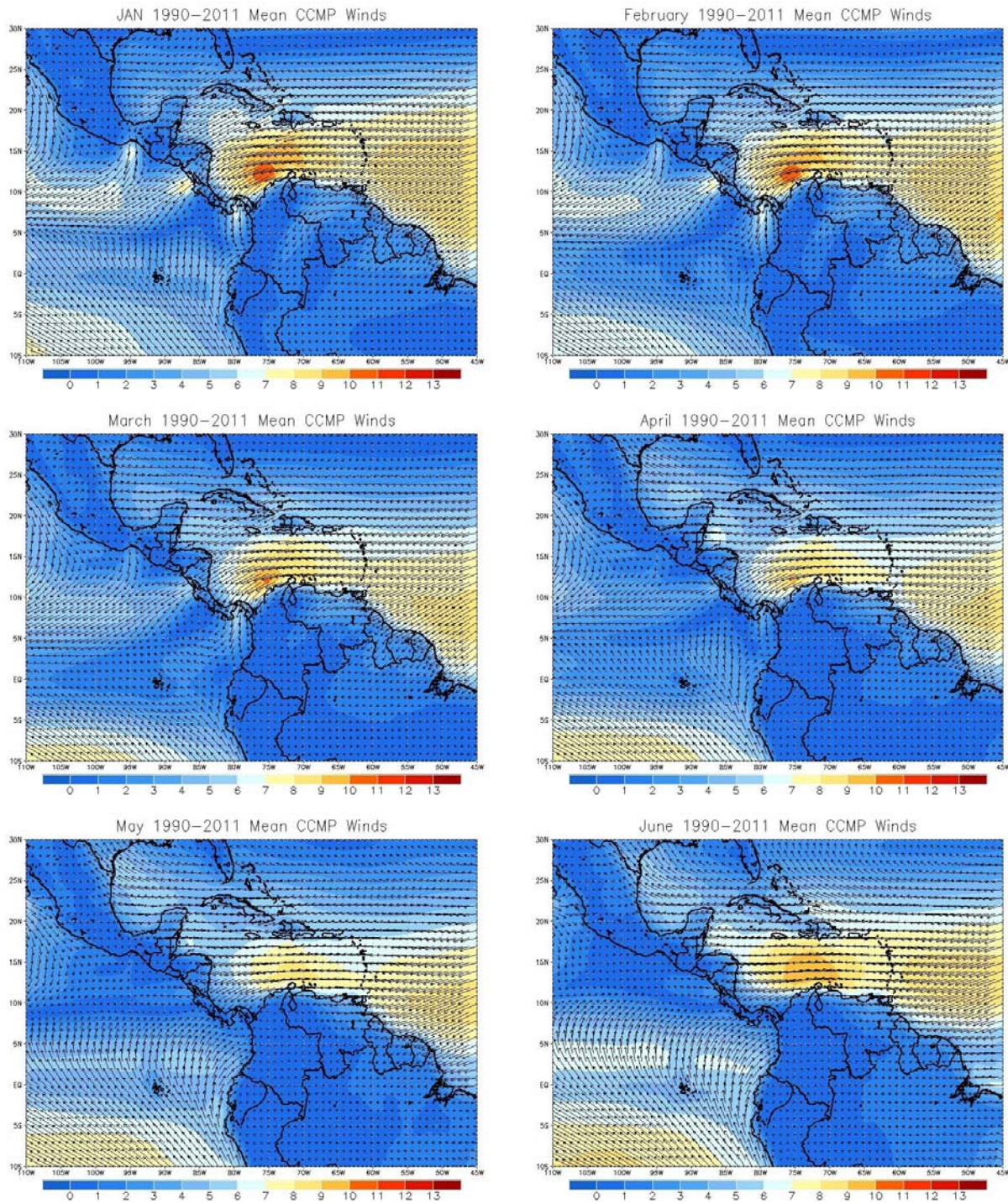


Figure 3a. Surface winds CCMP.

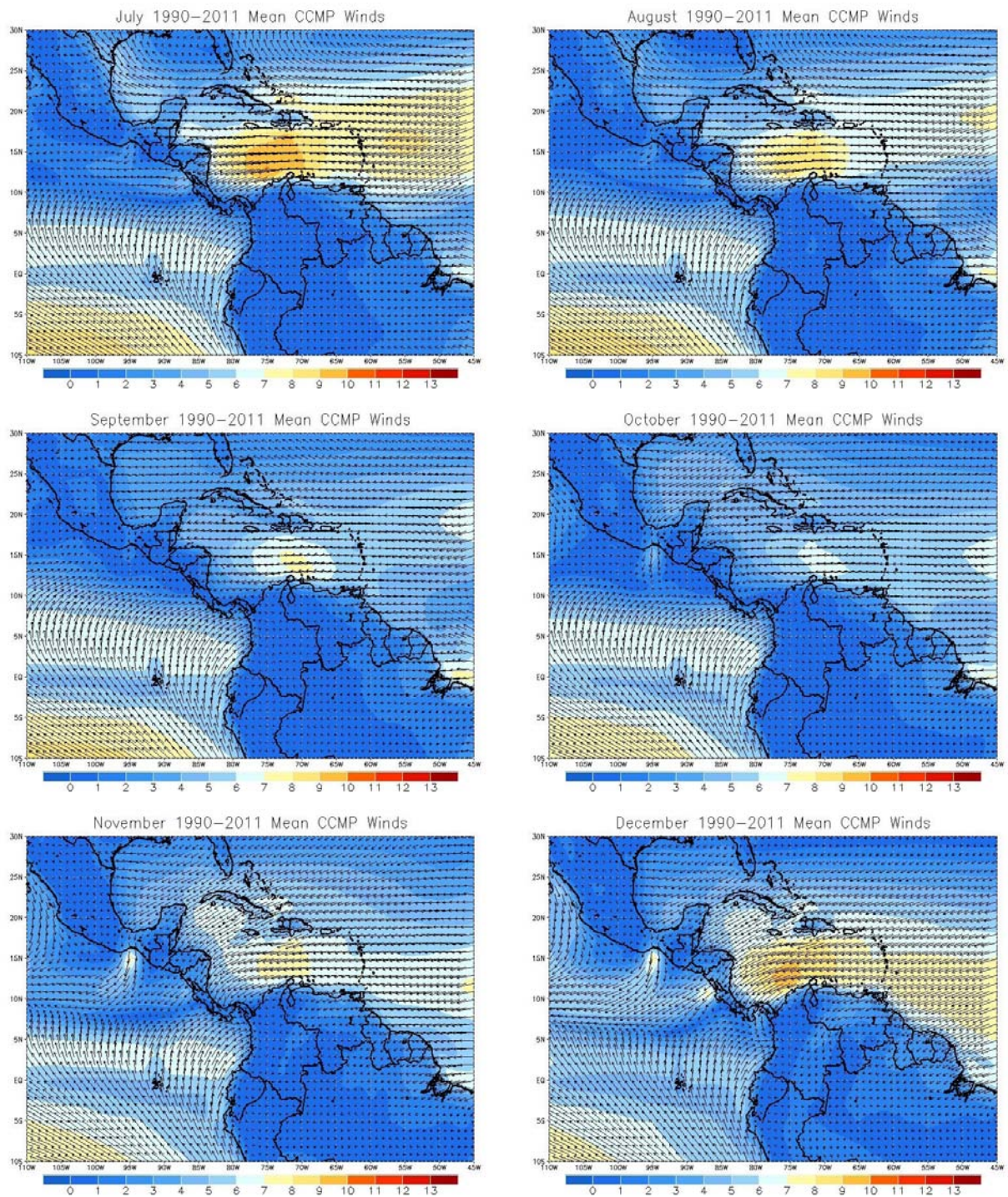


Figure 3a. Surface winds CCMP.

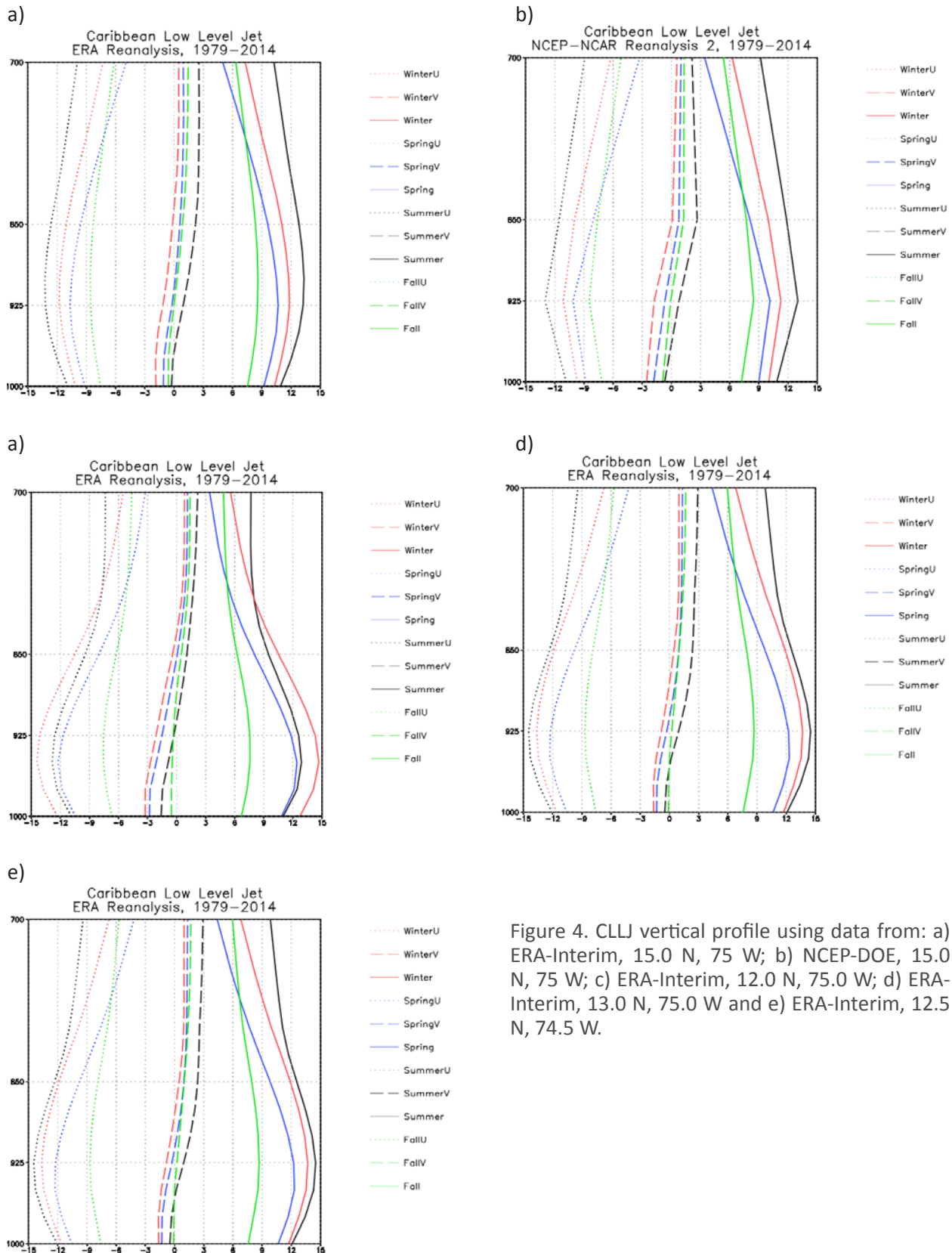


Figure 4. CLLJ vertical profile using data from: a) ERA-Interim, 15.0 N, 75 W; b) NCEP-DOE, 15.0 N, 75 W; c) ERA-Interim, 12.0 N, 75.0 W; d) ERA-Interim, 13.0 N, 75.0 W and e) ERA-Interim, 12.5 N, 74.5 W.

more confined. For instance, at surface level, the winter CLLJ seems to be stronger and displaced south-westward from the summer CLLJ. However literature suggests that the jet core is located between 925 and 700 mb, and that the summer jet is stronger than the winter jet; therefore the surface level is not a good indicator for finding the main position of this current. For this reason, additional calculations were made, changing the latitude and longitude of the jet core in order to find the location where the jet has its maximum wind speed. Table 1 shows the other coordinates used to find the jet core of the CLLJ (as well as coordinates for the other jets), and figures 4c, 4d and 4e show the corresponding results. Figure 4c seems to represent the winter jet better than the other figures, capturing its maximum strength below 925 mb. On the other hand, figure 4e shows a stronger summer jet when compared with its signal in other coordinates, as shown from fig. 4a to 4d; however, fig. 4d is also a good representation of the jet core, although it seems to underestimate the magnitude of the wind. These results suggest that the position of the jet core varies throughout the year, with a winter CLLJ closer to Central America, and a summer CLLJ more distant from the continent. Although not shown in

this article, horizontal profiles of the wind were created at 1000, 925, 850 and 700 mb using the ERA-Interim data, and it was found that the jet core is tilted northward between 925 and 850 mb. Additional studies should be conducted to explore such theory. As the summer jet is strongest at 925 mb, its average location appears to be between 12.5° and 13.0° N, and between 74.5° and 75.0° W, whereas the winter jet is centered at 12.0° N, 75.0° W, between 1000 and 925 mb.

When the jet is centered at 13.0° N and 75.0° W, both summer and winter jets seem to be well represented (figure 4d), making these coordinates a good approximation of its average annual position.

3.1.2 Tehuantepec Jet

The surface wind monthly figures from QuikScat (Fig. 2) and CCMP (Fig. 3) show an active Tehuantepec jet from October to February, with a maximum speed within the range of 7 to 10 m s^{-1} in December. The vertical profile of the total wind from the ERA Reanalysis (Fig. 5a) seems to capture this current better than the NCEP-DOE Reanalysis (Fig. 5b). Figure 5a shows the peak of this jet during

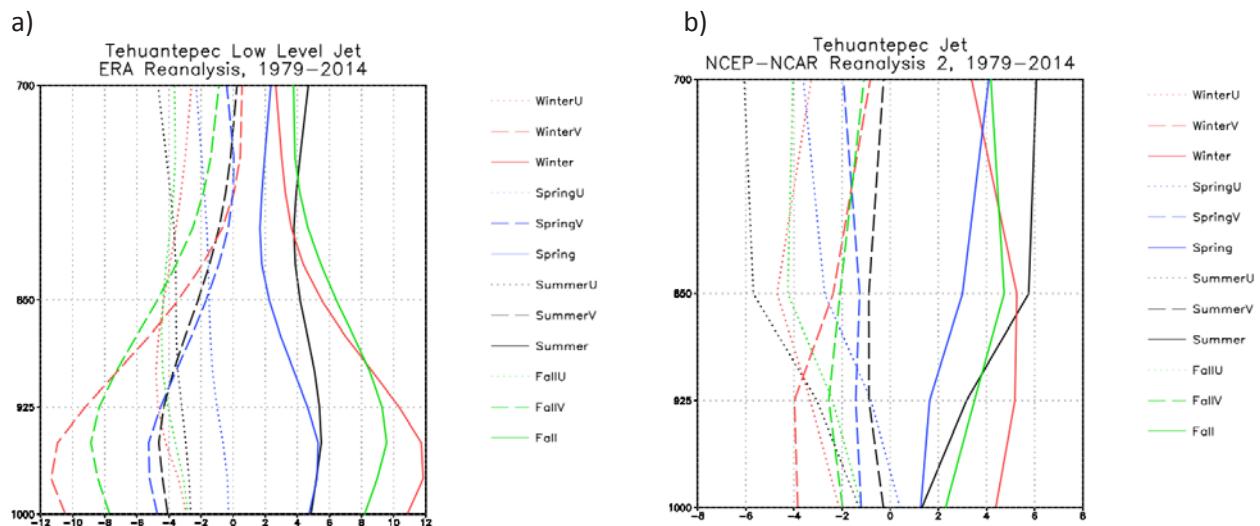


Figure 5. Tehuantepec jet vertical profile at 15.0° N, 95.0° W, from a) ERA-Interim and b) NCEP-DOE.

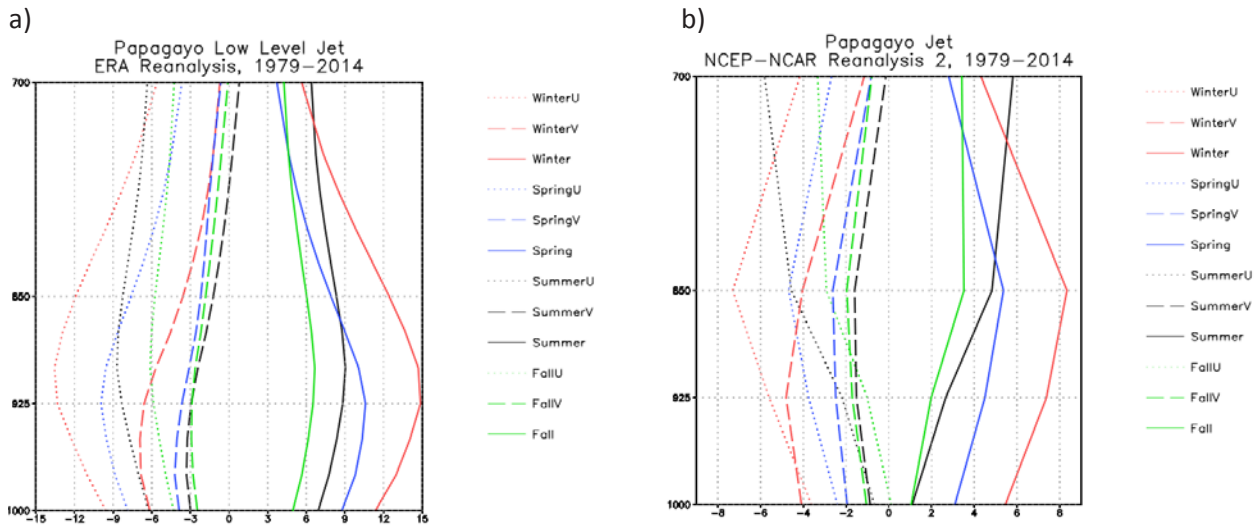


Figure 6. Papagayo jet vertical profile at 11.0 N, 86.0 W, from a) ERA-Interim and b) NCEP-DOE.

winter and fall (solid line), within 1000 and 925 mb. The same figure shows the vertical profile of the zonal wind U (dotted line) and the meridional wind V (dashed line). Comparing both components with the total wind, it is evident that the meridional component is responsible for the maximum speed during winter and fall at low levels.

3.1.3 Papagayo Jet

According to the results from the QuikScat and CCMP surface wind, the strongest activity of the Papagayo jet at surface level occurs from December to April, with maximum speeds of 8 to 9 $m s^{-1}$ in January. This behavior could be related to the maximum strength of the trade winds during this part of the year, crossing the continent through the land gap over northern Costa Rica, and thereby generating the Papagayo jet. The jet has a secondary maximum in July and August, coinciding with the activity of the CLLJ. This secondary maximum has approximately half the magnitude of the January maximum.

The vertical profiles of the total wind (Fig. 6a, solid lines) shows the maximum wind speeds during

winter (14 to 15 $m s^{-1}$) and spring (10 $m s^{-1}$) at 925 mb, explained mostly by the easterly winds (U , dotted line), which reaches a peak slightly above 925 mb. It is worth mentioning that the winter peak also has a meridional component (V , dashed line) which seems to be stronger below 925 mb, hereby centering the signal of the total wind at 925 mb.

Figure 6b shows a total wind peaking during winter and spring at 850 mb, dominated mostly by easterly winds at this level. However, near surface levels (below 925 mb), both zonal and meridional components have similar magnitude and contribution to the total wind speed.

3.1.4 Panama Jet

The Panama jet arises during northeasterly activity of the Caribbean trade winds, starting in December and strengthening throughout January and February, reaching a strong northerly component, allowing them to cross the Panama gap and extend into the Pacific ocean. In figures 2a and 3a, this jet is observed reaching its maximum strength in January and February (6 $m s^{-1}$). Although it is not as strong as the Papagayo

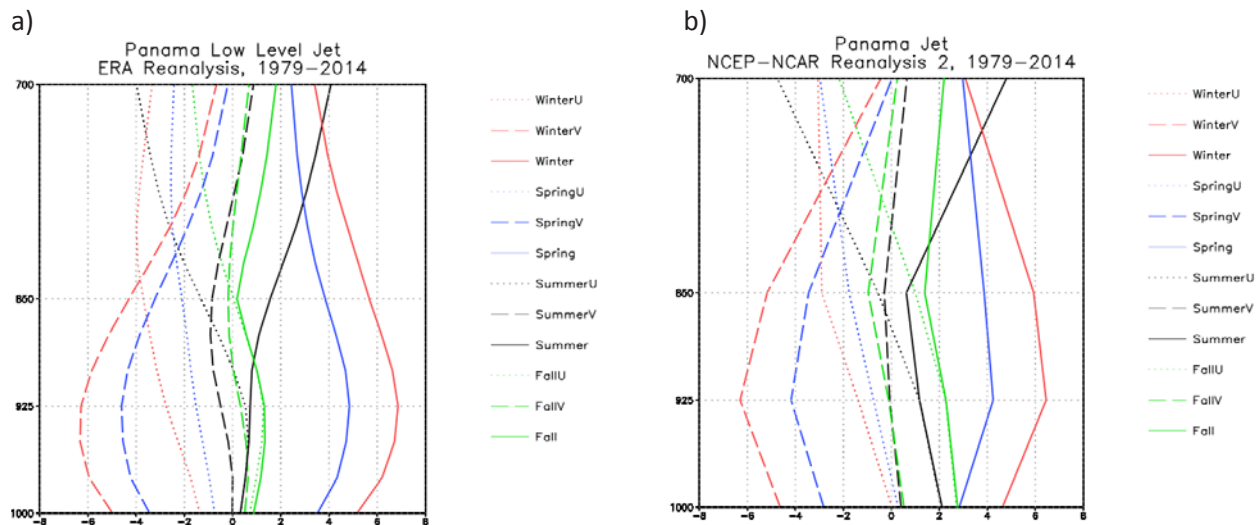


Figure 7. Panama jet vertical profile at 8.0 N, 79.0 W, from a) ERA-Interim and b) NCEP-DOE.

and Tehuantepec jets, the Panama Jet has an important influence on the local sea surface temperature (SST) and precipitation. It vanishes after March, when the southerly winds from the southern hemisphere begin to strengthen and converge into a -still relatively weak Intertropical Convergence Zone (ITCZ).

Similar results can be seen in the vertical profile of the total wind (Fig. 7a and 7b, solid line), where the peak of the jet is found at 925 mb during winter, with an approximate maximum speed of 7 m s^{-1} , and within 4 and 5 m s^{-1} during spring season. Northerly wind passing through the topographic gap is responsible for this jet. However on a larger scale, the zonal wind regime for these two seasons is predominantly of easterly winds, so these can also be observed strengthening the resulting wind speed during winter and spring, increasing in magnitude from the surface into higher levels of the area selected for this study.

3.1.5 Choco Jet

Maximum wind speeds can be found between surface and 925 mb at the location of the Choco

Jet, strengthening during summer and reaching its maximum value of 3.5 m s^{-1} during fall (Fig. 8a, 8b, solid lines). This pattern is explained by the strong trade winds from the southern hemisphere, blowing through the ocean and turning right near the continent as a response to the Coriolis effect and ocean-land temperature gradient.

The reanalysis from ERA-Interim (fig. 8a) shows a peak on the zonal wind at 925 mb that reaches its maximum value during fall, whereas the lower resolution of the NCEP reanalysis (fig. 8b) displays a maximum zonal value that remains constant from the surface to 925 mb. Although it is not part of the jet, the meridional wind in that area (dashed lines) shows maximum values at 850 mb during winter and spring, corresponding to the northerly incursion of the trade winds from the northern hemisphere, and between 1000 and 925 mb during summer and fall.

4. Conclusions

Various authors have studied the wind field in the tropical Americas, finding several strong currents at low levels of the atmosphere, known

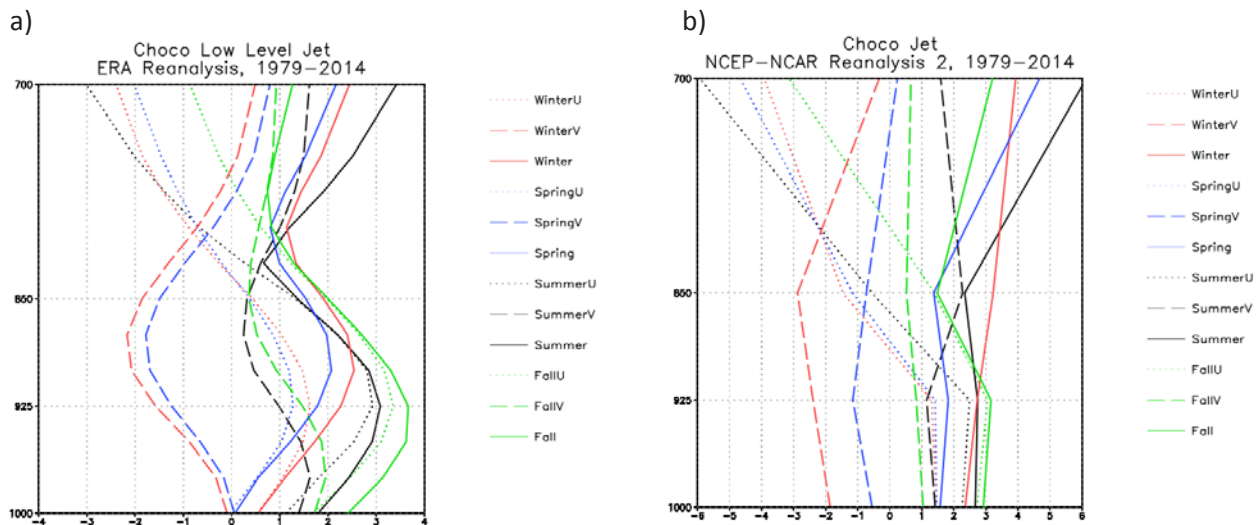


Figure 8. Choco jet vertical profile at 5.0 N, 78.0 W, from a) ERA-Interim and b) NCEP-DOE.

as low-level jets. These jets are important for redistributing moisture and momentum. The QuikScat and CCMP data used in this study allowed us to document the annual cycle of these significant jets on a surface level.

The most relevant features of the low level jets at surface level are:

- Caribbean low-level jet in January, February and March (11 m s^{-1}) and a second peak in June, July and August (10 m s^{-1}).
- Tehuantepec jet from October to February (10 m s^{-1}) and a secondary maximum in July and August (4 m s^{-1}).
- Papagayo jet from December to April (8 m s^{-1}) and a secondary maximum in July and August (5 m s^{-1}).
- Panama jet from December to February (6 m s^{-1}).
- Choco jet from May to November (5 m s^{-1}).

However, the use of the vertical profiles computed with NCEP-DOE and ERA-Interim data provides different results; for instance, the CLLJ is almost always stronger during summer than during winter, reaching the maximum speed at 925 mb where the zonal wind has maximum easterlies

permanently. According to the ERA vertical profile, the Papagayo jet reaches its maximum speed during winter at 925 mb (fig. 6a), and a secondary peak is found during spring at that same level; both peaks are mostly explained by the zonal component of the wind. On the other hand, the NCEP data shows how this jet reaches its maximum speed during winter at 850 mb. The Panama jet peaks at 925 mb during winter, evident in the vertical profiles from NCEP and ERA. The Choco jet appears mainly during fall and summer, with maximum speeds at 925 mb. With the exception of the Choco jet and to some extent the Tehuantepec jet, these jets are directly related to the annual cycle of the North Atlantic Subtropical High (NASH), known also as the Bermuda High when the core of the high pressure is located over the west Atlantic. The NASH is more intense and located farther north and west during the boreal summer than during winter. The winter maximum of the Tehuantepec Jet is produced when cold fronts move southeast, establishing a high pressure in the gulf of Mexico and accelerating the wind throughout the Isthmus of Tehuantepec. Considering that NASH is frequently pushed southward by polar masses from cold fronts in winter, the CLLJ can be explained by the acceleration of the trade winds when the NASH is

displaced southward or when it intensifies during summer. These strong trade winds cross the land gaps creating new jets: the Papagayo and Panama jets. In occasions, the CLLJ brings precipitation to the Caribbean coast between Nicaragua and Costa Rica, and sometimes even into western Costa Rica. The strong trade winds from this jet can be felt in the Central Valley of Costa Rica during the boreal winter and summer.

The Choco jet is the product of the meridional SST gradient between western Colombia and the Cold Tongue -a region of colder SST's explained by wind-driven Ekman transport-, bringing considerable amounts of precipitation to this country. As the Cold Tongue weakens during El Niño episodes, the meridional gradient of SST also weakens, as does the Choco Jet and rainfall activity in western Colombia.

5. Acknowledgments

The author would like to thank the projects VI-805-B4-227, VI-805-B0-065, VI-805-B6-143 and VI-805-A7-002 of the University of Costa Rica. Special thanks to Dr. Wayne Schubert, Brian McNoldy, Rick Taft and Paul Ciesielski from Colorado State University and to Jorge Amador from the University of Costa Rica, for their support with some of the figures and discussion.

6. References

- Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K., Gombos, D. (2011). A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 157-174.
- Amador, J. (1998). A Climatic Feature of Tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 5(2), 91-102.
- Amador, J., & Magaña, V. (1999). *Dynamics of the low-level jet over the Caribbean Sea*. Preprints 20th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. (pp. 401-402). Dallas, Texas: American Meteorological Society.
- Amador, J. A., Magaña, V. O., & Perez, J. B. (2000). *The low level jet and convective activity in the Caribbean*. Preprints 24th Conference in Hurricanes and Tropical Meteorology (pp.114-115). Fort Lauderdale, FL: American Meteorological Society.
- Amador, J., Alfaro, E., Lizano, O., & Magaña, V. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 101-142.
- Chelton, D., Freilich, M., & Esbensen, S. (2000). Satellite observations of the wind jets off the Pacific coast of Central America. Part II: Regional relationships and dynamical considerations. *Monthly Weather Review*, 128, 2019-2043.
- Chelton, D. B., Esbensen, S. K., Schlax, M. G., Thum, N., Freilich, M. H., Wentz, F. J., Gentemann, Ch. L., McPhaden, M.J. and Schopf, P. S. (2001). Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern tropical Pacific. *Journal of Climate*, 14, 1479-1498.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B., K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137: 553-597, doi: [10.1002/qj.828](https://doi.org/10.1002/qj.828).

- Fiedler, P. (2002). The annual cycle and biological effects of the Costa Rica dome. *Deep Sea Research*, 49, 321–338.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437–471.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J. J., Fiorino, M. and Potter, G. L., (2002). NCEP-DOE-AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1631–1643.
- Mapes, B., Warner, T., & Xu, M. (2003b). Diurnal Patterns of Rainfall in Northwestern South America. Part III: Diurnal Gravity Waves and Nocturnal Convection Offshore. *Monthly Weather Review*, 131, 830–844.
- Mapes, B., Warner, T., Xu, M., & Negri, A. (2003a). Diurnal Patterns of Rainfall in Northwestern South America. Part I: Observations and Context. *Monthly Weather Review*, 131, 799–812.
- Mora, I., & Amador, J. (2000). El ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 12, 27–39.
- Perry, K.L. (2001). *SeaWinds on QuikSCAT Level 3. Daily, Gridded Ocean Wind Vectors (JPL SeaWinds Project)*. Version 1.1, JPL Document D-20335, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 28, 201–221.
- Poveda, G. & Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste (del Choco) y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 23, 517–528.
- Poveda, G. & Mesa, O. (2000). On the existence of Lloro (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27, 1675–1678.
- Trasviña, A., & Amador, J. (2005). Eastern Pacific coastal dynamics and the Intra-Americas summer low level jet. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 437–471.
- Umatani, S., & Yamagata, T. (1991). Response of the eastern tropical Pacific to meridional migration of the ITCZ: The generation of the Costa Rica Dome. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 346–363.
- Wallace, J., Mitchell, T., & Deser, C. (1989). The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal and interannual variability. *Journal of Climate*, 2, 1492–1499.
- Wang, C., Lee, S. (2007). Atlantic warm pool, Caribbean low level jet and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 34, L02 703, doi:10.1029/2006GL028 579.
- Warner, T., Mapes, B., & Xu, M. (2003). Diurnal Patterns of Rainfall in Northwestern South America. Part II: Model Simulations. *Monthly Weather Review*, 131, 813–829.
- Xie, S. (1998). Ocean-atmosphere interaction in the making of the Walker Circulation and Equatorial Cold Tongue. *Journal of Climate*, 11, 189–201.
- Xie, S., Xu, H., Kessler, W., & Nonaka, M. (2005). Air-sea interaction over the Eastern Pacific Warm Pool: Gap winds, thermocline dome, and atmospheric convection. *Journal of Climate*, 18, 5–20.
- Yin, B., & Albrecht, B. (2000). Spatial variability of atmospheric boundary layer structure over the eastern equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 13, 1574–1592.
- Yu, J., & Mechoso, C. (1999). Links between annual variations of Peruvian stratocumulus clouds and of SST in the eastern equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 12, 3305–3318.

Análisis de incertidumbre utilizando el método de Montecarlo, en la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energía, en el año 2012, en Costa Rica

KENDAL BLANCO SALAS¹

Resumen

Establecer de manera clara las incertidumbres de las emisiones, garantiza mayor confiabilidad en los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Este trabajo tuvo como objetivo, evaluar las incertidumbres de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energía mediante el método de Montecarlo para el año 2012 en el país. Se realizó la estimación para los gases CO₂, CH₄ y N₂O, así como CO₂ equivalente para las diferentes subcategorías de combustión estacionaria y combustión móvil. Las emisiones totales para el sector fueron de 7.132 gigagramos de CO₂ equivalente con una incertidumbre estimada de $\pm 2\%$ siguiendo el ajuste a una distribución normal. Se recomienda extender este estudio para todo el inventario nacional del 2012 y utilizarlo como base en futuros inventarios.

PALABRAS CLAVE: MÉTODO DE MONTE CARLO, INCERTIDUMBRES, EMISIONES, GASES DE EFECTO INVERNADERO.

Abstract

To establish clearly the uncertainties of emissions ensures reliability in emissions inventories. The objective of this work was to evaluate the uncertainties of the greenhouse gas emissions of the energy sector through a Montecarlo analysis for 2012 in the country. The estimate was made for CO₂, CH₄ and N₂O gases, as well as equivalent CO₂, also this study included different subcategories of stationary and mobile combustion. The total emissions for the sector were 7132 gigagrams of CO₂ eq with an estimated uncertainty of $\pm 2\%$ following and an adjustment to a normal distribution. It is recommended to extend this study for the entire 2012 national inventory and use it as a basis for future inventories.

KEY WORDS: UNCERTAINTY, EMISSIONS. MONTE CARLO METHOD, GREENHOUSE GASES.

1. Introducción

Garantizar que las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero sean confiables, es una tarea difícil pero necesaria para entender el impacto en el cambio climático y para proyectar el comportamiento de estas emisiones en el futuro; es por esto que se recomienda el cálculo de las incertidumbres asociadas a las emisiones.

Según lo establecido en las Directrices del IPCC de 2006, para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, se denomina incertidumbre a la falta de conocimiento del valor verdadero de una variable que puede describirse como una función de densidad de probabilidad (FDP) y que caracteriza el rango y la probabilidad de los valores posibles. La incertidumbre depende del nivel de conocimiento del analista, el cual,

¹ Ing. Químico. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: kblanco@imn.ac.cr

a su vez, depende de la calidad y la cantidad de datos aplicables, así como del conocimiento de los procesos subyacentes y de los métodos de inferencia.

Igualmente, el IPCC (2006) define una función de densidad de probabilidad (FDP) como aquella función que describe el rango y probabilidad de posibles valores. Se puede utilizar la FDP para describir la incertidumbre de la estimación de una cantidad que es una constante fija cuyo valor no se conoce con exactitud, o se la puede utilizar para describir la variabilidad inherente.

Los modelos de funciones de densidad de probabilidad utilizados de manera más regular, son los mostrados en la figura 1, aunque para emisiones y las variables involucradas en el cálculo, las más comunes son la normal (d) y la log normal (e).

Generalmente cuando se estiman parámetros como lo son las emisiones, se obtienen valores puntuales que no brindan información confiable, es decir un solo valor no es tan significativo como

un intervalo dentro del cual se espera encontrar el valor real (desconocido), a este intervalo se le conoce como intervalo de confianza. (Montgomery, 2002).

En el caso de análisis de incertidumbre se acostumbra utilizar intervalos de confianza con una probabilidad del 95%.

En las Directrices del IPCC 2006 para Inventario Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, se establece como una buena práctica la estimación de las incertidumbres para las emisiones e incluso la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) incentiva a los países a realizar el cálculo de las incertidumbres y que sea incluido en los Inventarios Nacionales de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero que se presentan a la Convención.

El IPCC establece dos niveles para la estimación de las incertidumbres del inventario de emisiones de GEI, el primero denominado Método 1 que se basa en el uso de la ecuación de propagación de error tal como se muestra en la ecuación 1.

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad (1)$$

Donde:

U_{total} : Porcentaje de incertidumbre del producto de las cantidades.

U_i : Porcentaje de incertidumbre asociado con cada una de las cantidades.

El Método 2 que fue el utilizado en esta investigación, comprende un análisis de Monte Carlo en un nivel de desagregación mayor incluyendo correlaciones de las variables y considerando que las emisiones y los datos de actividad no son valores únicos o absolutos, sino que son una distribución de valores dentro de la cual se encuentra el valor real y que son representadas por una media y su respectiva incertidumbre asociada. En el siguiente apartado se mostrará en más detalle este método.

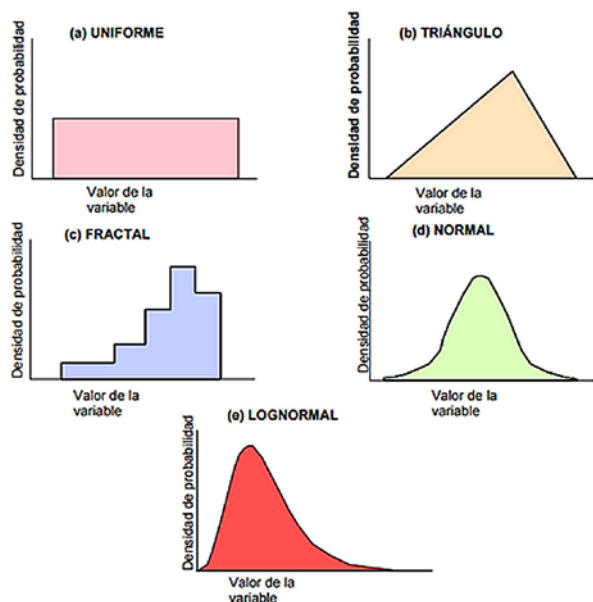


Figura 1. Tipos de funciones de densidad de probabilidad. Basado en Frey y Rubin (1991) e IPCC (2006).

2. Metodología

Este estudio tuvo como objetivo, estimar la incertidumbre de las emisiones de gases de efecto invernadero del Sector Energía, del Inventario Nacional de Costa Rica, del año 2012, utilizando el Método de Monte Carlo. Esta estimación incluyó tanto combustión móvil como combustión estacionaria y se excluyeron las emisiones de generación de energía geotérmica ya que no fue posible determinar la incertidumbre del dato de actividad, esto no afectó el análisis debido a que representaban únicamente el 1,2% de las emisiones del sector.

Además, no se logró incluir en este estudio el análisis las incertidumbres de las emisiones del uso de LPG para combustión móvil. Se excluyeron también, las emisiones de Etanol añadido a la gasolina y usado en pruebas realizadas por la Refinadora Costarricense de Petróleo, esto con base en que estas emisiones fueron insignificantes en los cálculos presentados en el inventario del año 2012.

Se definió como año de estudio el 2012, debido a que es el último Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Absorción de Carbono presentado por el país.

Cabe indicar, que este estudio no abarca de manera completa un Nivel 2 de análisis, ya que lo que se hizo fue tomar valores de factores de emisión ya utilizados y definidos en el inventario del 2012 y recalcular las emisiones utilizando el Método de Monte Carlo.

El nivel de desagregación de este estudio es muy detallado ya que incluyó información por subcategorías, categorías y para el sector completo, considerando todos los combustibles consumidos y por gas para dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq).

El IPCC (2006) define cinco suposiciones clave del Método 2, a saber:

- Las incertidumbres son grandes.
- Su distribución no es Gaussiana.
- Los algoritmos son funciones complejas.
- Hay correlaciones entre algunos de los conjuntos de datos de actividad, factores de emisión o ambos.
- Las incertidumbres son diferentes para los distintos años del inventario.

Para este estudio se obvió la última suposición, ya que como se mencionó anteriormente, se está analizando únicamente un año y no la tendencia.

Contrario al método de propagación de error donde el análisis de incertidumbre se puede realizar posterior al cálculo de las emisiones, las incertidumbres utilizando el Método de Montecarlo deben ser determinadas simultáneamente con las emisiones. En general, las emisiones fueron determinadas multiplicando un factor de emisión por el dato de actividad, tal como se muestra en la ecuación 2. Los datos de actividad utilizados fueron los mismos del Inventario Nacional de Emisiones del 2012, que corresponden al consumo de los diferentes combustibles en combustión móvil y en combustión estacionaria.

$$E = FE \times DA \quad (2)$$

Donde:

E: Emisiones.

FE: Factor de emisión.

DA: Dato de actividad.

Una vez que se obtuvieron los valores de los factores de emisión y de los datos de actividad, se procedió a especificar las incertidumbres así como definir las funciones de densidad de probabilidad para todos los datos de entrada. Todos estos parámetros fueron entradas del modelo de cálculo.

La segunda etapa consistió en tomar valores aleatorios dentro de cada función de densidad

de probabilidad para cada variable y evaluar las emisiones correspondientes (emisiones por fuente, suma para obtener los valores por subsector y la suma para el sector energía completo). Este proceso se realiza con un número definido de repeticiones, generando con los valores de emisiones obtenidos una distribución de donde se podrán obtener las incertidumbres asociadas, así como la FDP que siguen las emisiones.

La figura 2 muestra de manera resumida el proceso de estimación de incertidumbres siguiendo el Método de Monte Carlo.

Para realizar la simulación del proceso en este caso específico, se usaron 100.000 iteraciones utilizando un muestreo aleatorio y eligiendo el valor inicial generador de la simulación de manera aleatoria.

Por último se realizó un ajuste de los datos por gas, por categoría y para el sector, obteniendo la mejor FDP conocida.

Un estudio similar realizado en los Países Bajos y descrito por Ramírez, De Kaizer, Van der Sluijs, Olivier & Brandes (2006), comparó las incertidumbres calculadas con el Método 1 con las desviaciones estándar (2σ) obtenidas en el método de Montecarlo, sin embargo, en este trabajo se compararon tomando el intervalo

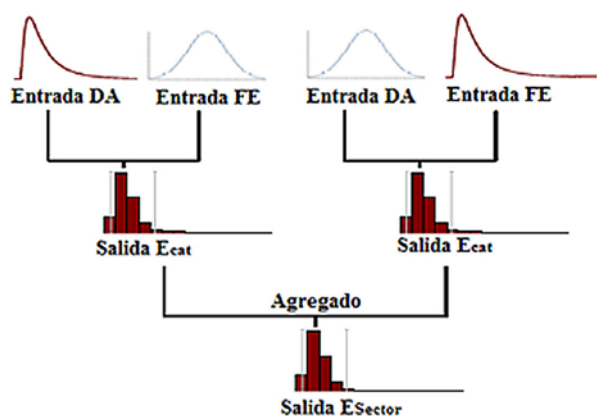


Figura 2. Esquema del proceso de estimación de emisiones usando el Método de Monte Carlo. Fuente: Ramírez et al (2006).

de confianza como el comprendido entre los percentiles 2,5% y 97,5% de las distribuciones obtenidas con Montecarlo, tal como lo establecen Monni y Syri (2003) para el caso de Finlandia.

3. Resultados y discusión

La definición de las incertidumbres de los datos de actividad y de los factores de emisión así como las FDP seguidas, fueron de vital importancia para el desarrollo de este estudio. En su mayoría, se utilizaron valores por defecto establecidos en las Directrices del IPCC del 2006 y siguiendo el juicio de expertos.

Para determinar la función de densidad de probabilidad que mejor se ajustara a los datos obtenidos en la simulación, se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC por sus siglas en inglés) siguiendo lo descrito por Snipes y Taylor (2014) y Akaike (1973), que establecen que el modelo con menor AIC será el que mejor se ajuste a los datos.

Se debe indicar también, que la simulación involucró 406 entradas y se obtuvieron como resultado 376 salidas, de las cuales se muestran las más relevantes.

3.1. Emisiones debidas a la combustión estacionaria

3.1.1 Emisiones de dióxido de carbono

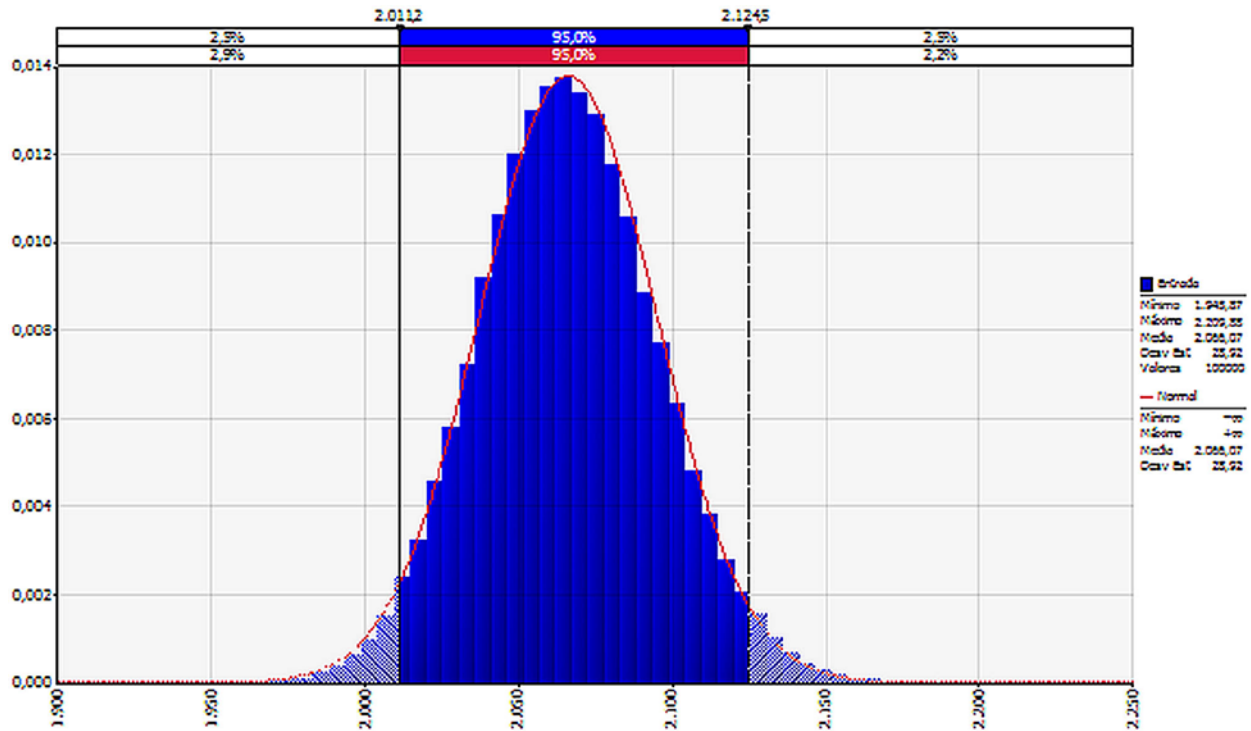
En el cuadro 1 se presentan las emisiones de CO₂ para las diferentes fuentes del subsector denominado combustión estacionaria, así como sus respectivas incertidumbres. En general, para el caso del dióxido de carbono, las emisiones se distribuyeron siguiendo una distribución normal.

Los valores presentados en el Inventario Nacional de Emisiones del 2012, para CO₂ en el subsector de combustión estacionaria fue de 2.067,70 Gg,

Cuadro 1. Emisiones de CO₂ e incertidumbres calculadas para las subcategorías de combustión estacionaria

Fuente	Media	CO ₂ (Gg) 2,5%	97,5%
Producción de energía	588,2	563,1	615,3
Industria de manufactura y construcción	1.089,9	1.047,8	1.136,8
Comercial, institucional y servicios	117,1	107,9	126,7
Residencial	148,6	134,2	163,1
Agricultura	122,2	106,2	138,3

Elaboración propia.

Figura 3. Distribución de los datos de emisiones de CO₂ de combustión estacionaria.Cuadro 2. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la función de densidad de probabilidad, para emisiones de CO₂ de combustión estacionaria

Fuente	Media	CO ₂ (Gg) Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	2.066,1	2.011,2	2.124,5
Total ajustado (FDP Normal)	2.066,1	2.009,4	2.122,8

Elaboración propia.

mientras que utilizando el método de Montecarlo se obtuvieron 2.066,1 Gg de CO₂ siendo la diferencia de apenas 0,08%. En la figura 3 se muestra la distribución de los datos simulados, mientras que en el cuadro 2 se presentan los

valores para las incertidumbres con un 95% de confianza. Para determinar el ajuste, la mejor función de densidad de probabilidad fue la normal obteniendo el valor más bajo para el AIC. Para las emisiones de CO₂ utilizando Nivel 1,

Cuadro 3. Emisiones de CH₄ e incertidumbres calculadas para las subcategorías de combustión estacionaria

Fuente	Media	CH ₄ (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Producción de energía	0,077	0,034	0,169
Industria de manufactura y construcción	0,64	0,28	1,52
Comercial, institucional y servicios	0,337	0,109	0,891
Residencial	2,32	0,82	5,87
Agricultura	0,0180	0,0062	0,0393

Elaboración propia.

las incertidumbres calculadas fueron de $\pm 5,5\%$, mientras que las obtenidas utilizando Nivel 2 fueron de $-2,7\%$ y $+2,8\%$, y para el ajuste $\pm 2,7\%$, lo que indica valores de incertidumbre más bajos que los de Nivel 1.

siguieron en todos los casos distribuciones de probabilidad lognormales, es decir se obtuvieron incertidumbres asimétricas (a diferencia de las de CO₂), comportamiento esperable debido a la alta incertidumbre de los factores de emisión utilizados.

3.1.2 Emisiones de metano

Las emisiones de CH₄ para las diferentes subcategorías de la combustión estacionaria se encuentran en el cuadro 3, se obtuvieron los valores de los percentiles 2,5% y 97,5% y

Como se esperaba la distribución del total de emisiones de CH₄ también se comportó siguiendo una distribución lognormal, tal como se muestra en la figura 4. En la misma figura se observa el ajuste realizado.

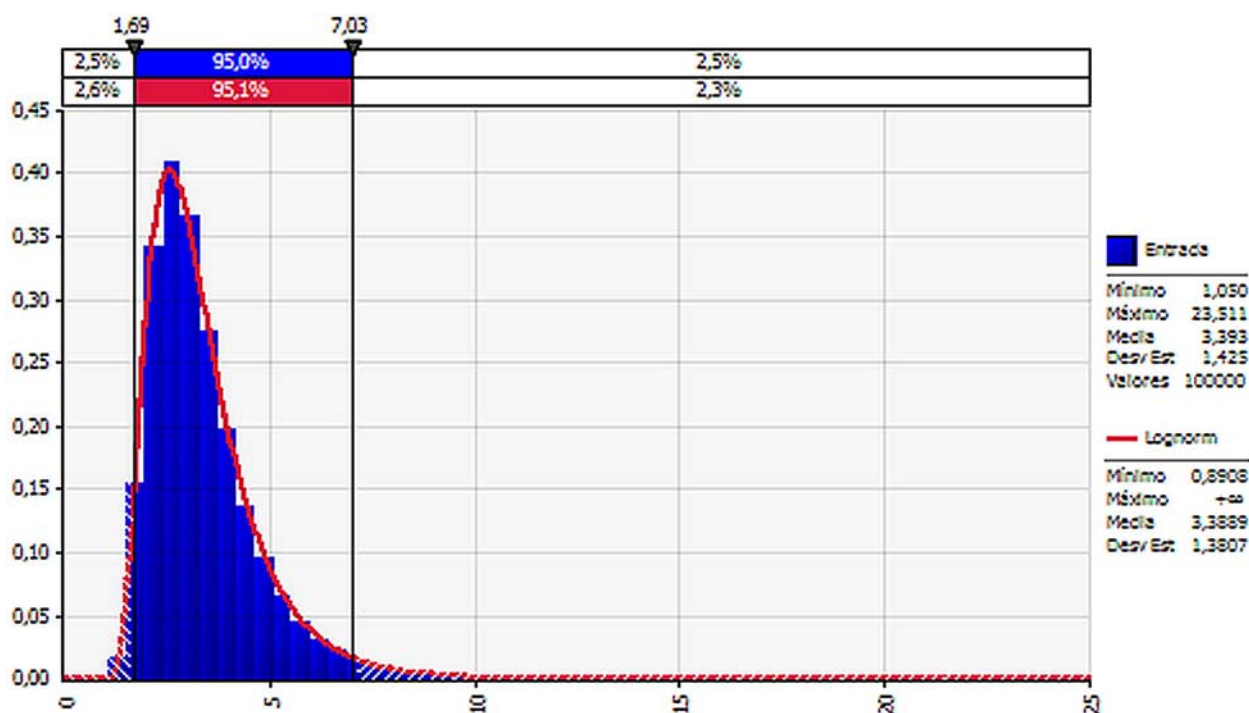


Figura 4. Distribución de los datos de emisiones de CH₄ de combustión estacionaria.

Cuadro 4. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la función de densidad de probabilidad para emisiones de CH₄ de combustión estacionaria

Fuente	Media	CH ₄ (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	3,39	1,69	7,03
Total ajustado lognormal	3,39	1,69	6,91

Elaboración propia.

Las emisiones totales de CH₄ para el año 2012 usando Montecarlo, fueron de 3,393 Gg, con una incertidumbre de -50% y +107%, tal como se muestra en el cuadro 4. Al compararlas con las emisiones obtenidas anteriormente, se encontró una diferencia de un 11% (3,035 Gg) atribuible a la variabilidad que se introduce al utilizar distribuciones de probabilidad para describir el comportamiento de las variables. Además, la incertidumbre determinada anteriormente fue de $\pm 42\%$, esto suponiendo valores de hasta $\pm 100\%$, lo que redujo la incertidumbre en comparación de la obtenida con Montecarlo.

En el caso de los datos del ajuste mostrados en el cuadro 4, las medias son iguales, mientras que 0,12 Gg separan a los valores dados para el percentil 97,5%.

3.1.3 Emisiones de óxido nítrico

Las emisiones de N₂O se estimaron de manera similar a los otros dos gases, se hicieron los cálculos para las mismas subcategorías tal como se presenta en el cuadro 5. Como era de esperar las emisiones de este gas fueron considerablemente más bajas y las incertidumbres obtenidas son asimétricas, es decir el porcentaje (%) superior e inferior son diferentes.

Para este caso, el mejor ajuste mostrado en la figura 5, fue una distribución lognormal con media de 0,146 Gg que difiere de la media de la simulación en 0,001 Gg (ver cuadro 6).

Las incertidumbres fueron de -44,8% y +99%, mientras que la estimada con Nivel 1 fue de $\pm 70\%$. Al igual que el caso del metano, se tuvieron que considerar para el cálculo de las incertidumbres

Cuadro 5. Emisiones de N₂O e incertidumbres calculadas para las subcategorías de combustión estacionaria

Fuente	Media	N ₂ O (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Producción de energía	0,0125	0,0057	0,0278
Industria de manufactura y construcción	0,093	0,042	0,228
Comercial, institucional y servicios	0,0055	0,0021	0,0155
Residencial	0,034	0,012	0,099
Agricultura	0,00115	0,00041	0,00304

Elaboración propia.

Cuadro 6. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la función de densidad de probabilidad para emisiones de N₂O de combustión estacionaria

Fuente	Media	N ₂ O (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	0,147	0,081	0,292
Total ajustado lognormal	0,146	0,081	0,286

Elaboración propia.

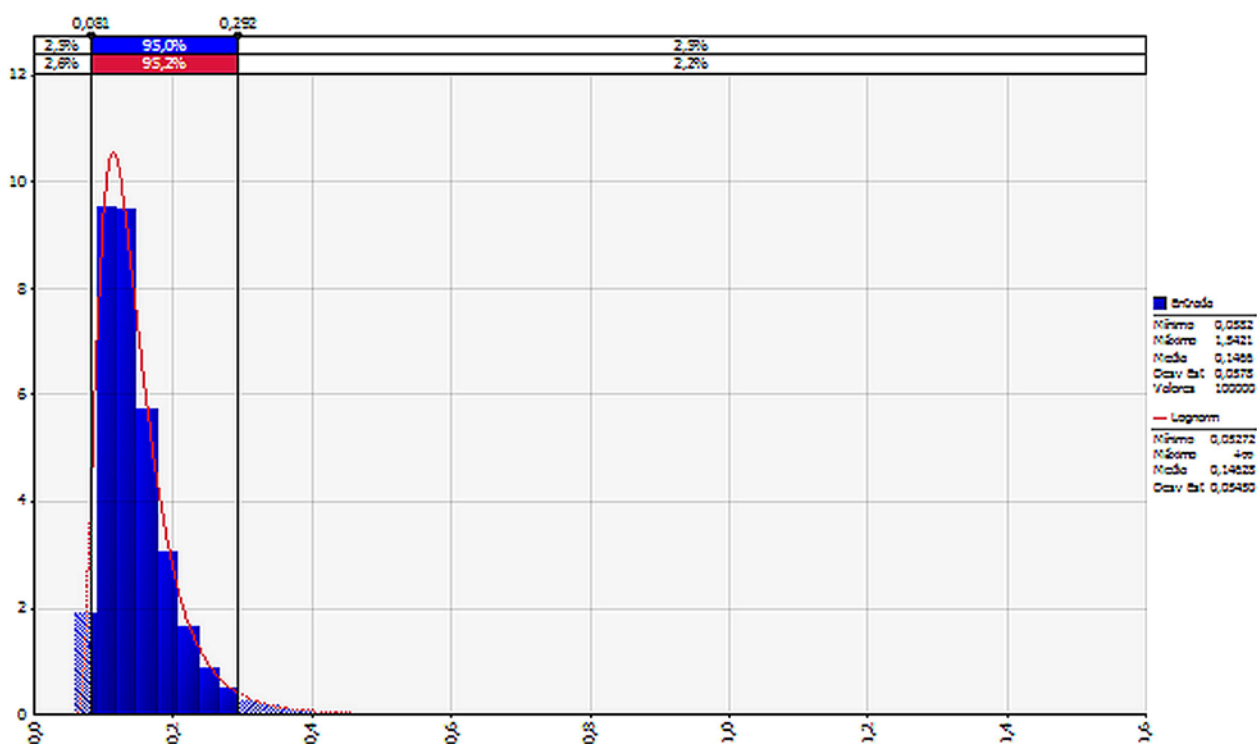


Figura 5. Distribución de los datos de emisiones de N₂O de combustión estacionaria.

con Nivel 1 valores máximos de ± 100 , esto aunque existan incertidumbres con percentil 97,5% de hasta 200%, ya que al combinarlas usando propagación de error podrían dar valores negativos de emisiones lo que no sería posible en este caso.

3.1.4 Emisiones de dióxido de carbono equivalente

Por último, se realizó la conversión de los totales de gases para combustión estacionaria a CO₂

equivalente, utilizando los valores de potencial de calentamiento global para países no Anexo I y se combinaron los totales mediante adición. En este caso la media total y la ajustada de una distribución lognormal como la mostrada en el cuadro 7 y la figura 6 son iguales. La incertidumbre es de -3,5% y +4,7% mientras que para el Nivel 1 fueron de $\pm 5,5$, resultando ligeramente menores. Para el inventario nacional se habían estimado 2.168,7 Gg, los cuales se encuentran dentro de los límites de incertidumbre ya que apenas son un 0,7%, menores a los 2.183 Gg estimados con Montecarlo.

Cuadro 7. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la Función de Densidad de Probabilidad para emisiones de CO₂ equivalente de combustión estacionaria

Fuente	Media	CO ₂ eq(Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	2.183	2.107	2.285
Total ajustado lognormal	2.183	2.107	2.283

Elaboración propia.

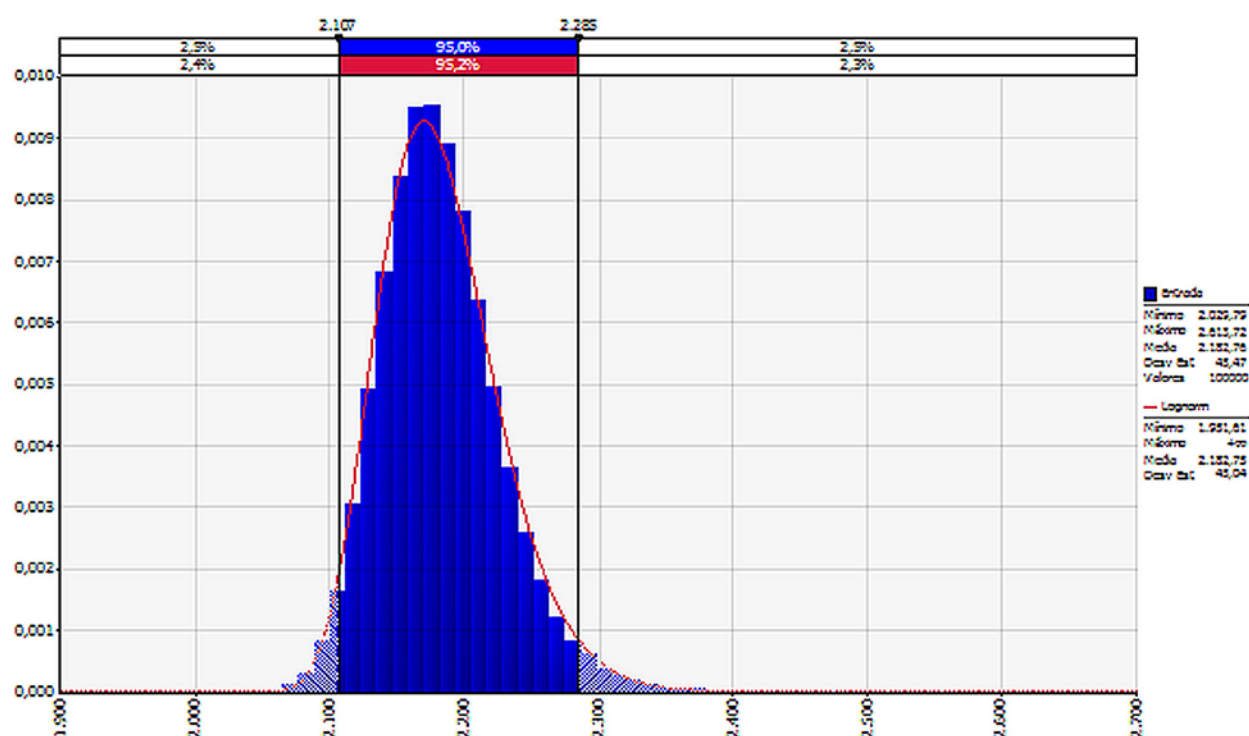


Figura 6. Distribución de los datos de emisiones de CO₂ equivalente de Combustión estacionaria.

3.2. Emisiones debidas a la combustión móvil.

Para las emisiones de CO₂ debidas a la combustión móvil, se tomó la clasificación de categorías de vehículos determinadas por el IPCC en las Directrices del 2006.

3.2.1 Dióxido de carbono debido a combustión móvil

La contribución de las diferentes subcategorías mostradas en el cuadro 8 al total de las emisiones, no cambió al realizar la simulación de Montecarlo. Los percentiles de 2,5% no superan el -5% y +5%, mientras que para el total de transporte terrestre se obtuvo $\pm 2\%$ de incertidumbre. Igualmente se realizó el cálculo para otro tipo de transporte como el ferrocarril, el transporte marítimo y el

Cuadro 8. Emisiones de CO₂ e incertidumbres calculadas para las subcategorías de transporte terrestre

Categoría de fuente	Media	CO ₂ (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Automóviles y carros para pasajeros	2.139,3	2.068,8	2.211,4
Camiones para servicio ligero	1.024,7	982,5	1.066,8
Camiones para servicio pesado	1.038,4	997,5	1.079,6
Motocicletas	260,4	247,7	273,6
Equipo especial	292,4	277,9	307,0
Total transporte terrestre	4.755,3	4.661,8	4.850,5

Elaboración propia.

aéreo nacional, los resultados obtenidos para CO₂ se muestran en el cuadro 9.

Al total de emisiones de transporte terrestre se le adicionaron las emisiones de CO₂ de las otras subcategorías, obteniendo así la distribución de las emisiones mostrada en la figura 7, en donde

se observa un comportamiento que sigue una FDP normal con una incertidumbre de 1,95%, estos valores son los presentados en el cuadro 10. Al comparar la media de emisiones se obtiene una diferencia de apenas un 0,5%, siendo mayores las presentadas en el Inventario Nacional de Emisiones (4.827,66 Gg de CO₂).

Cuadro 9. Emisiones de CO₂ e incertidumbres calculadas para otras subcategorías

Categoría de fuente	Media	CO ₂ (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Ferrocarril	4,200	3,980	4,421
Transporte Marítimo	4,127	3,913	4,343
Transporte Aéreo	38,19	36,09	40,31

Elaboración propia.

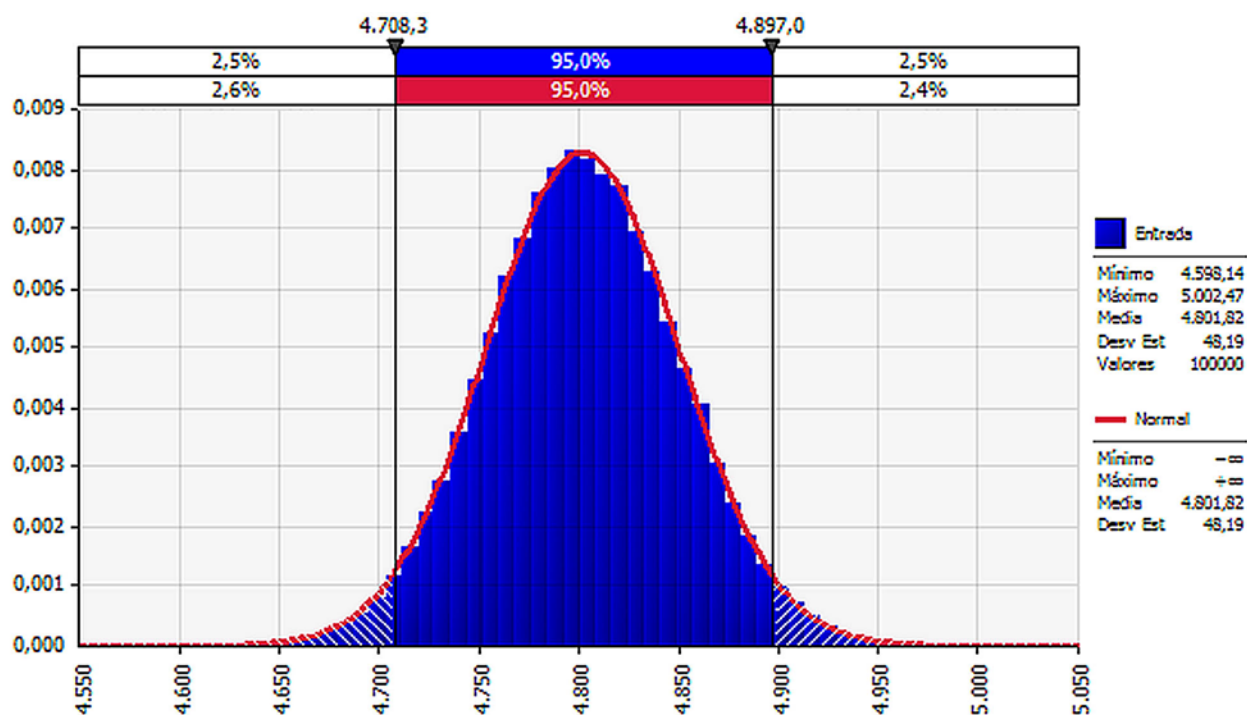


Figura 7. Distribución de los datos de emisiones de CO₂ de Combustión móvil.

Cuadro 10. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la función de densidad de probabilidad para emisiones de CO₂ equivalente de combustión móvil

Fuente	Media	CO ₂ (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	4.801,8	4.708,3	4.897,0
Total ajustado Normal	4.801,8	4.707,4	4.896,3

Elaboración propia.

3.2.2 Metano debido a combustión móvil

Igual que para CO₂, se calcularon las emisiones de CH₄ para las subcategorías de transporte terrestre

tal como se presenta en el cuadro 11, el total fue de 1,39 Gg con una incertidumbre de -41% y + 82%. Además en el cuadro 12, se muestra que las emisiones debidas a otras modalidades de

Cuadro 11. Emisiones de CH₄ e incertidumbres calculadas para las subcategorías de transporte terrestre

Categoría de fuente	Media	CH ₄ (Gg) Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Automóviles y carros para pasajeros	1,04	0,51	1,66
Camiones para servicio ligero	0,118	0,059	0,232
Camiones para servicio pesado	0,0593	0,0318	0,1012
Motocicletas	0,136	0,052	0,350
Equipo especial	0,0358	0,0184	0,0658
Total transporte terrestre	1,39	0,82	2,54

Elaboración propia.

Cuadro 12. Emisiones de CO₂ e incertidumbres calculadas para otras subcategorías

Categoría de fuente	Media	CH ₄ (Gg) Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Ferrocarril	0,000257	0,000095	0,000590
Transporte Marítimo	0,000235	0,000089	0,000531
Transporte Aéreo	0,000266	0,000124	0,000512

Elaboración propia.

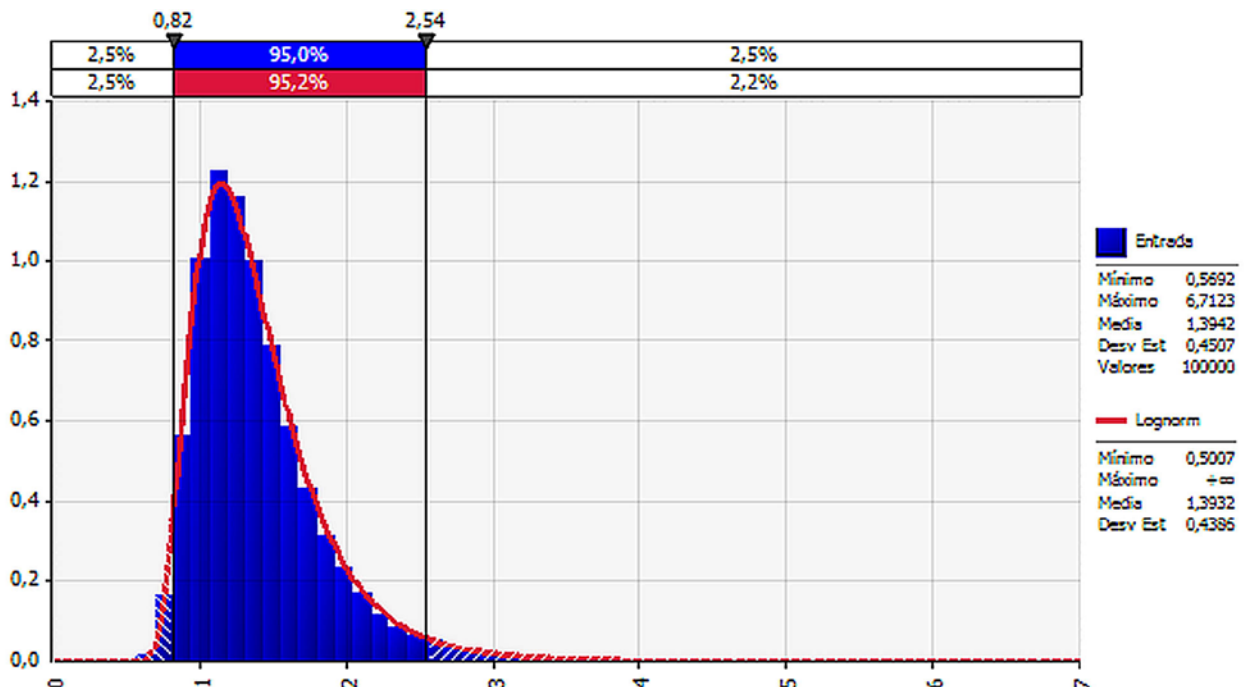


Figura 8. Distribución de los datos de emisiones de CH₄ de combustión móvil.

Cuadro 13. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la función de densidad de probabilidad para emisiones de CH₄ de combustión móvil

Fuente	Media	CH ₄ (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	1,39	0,82	2,54
Total ajustado	1,39	0,82	2,49

Elaboración propia.

transporte son insignificantes en comparación con las producidas por el transporte terrestre.

Al combinar las emisiones de metano de las diferentes modalidades de transporte en el país, se obtuvieron datos que siguen una distribución asimétrica tal como la mostrada en la figura 8, comportándose de manera lognormal. Tal como se observa en el cuadro 13, la media de emisiones de los datos calculados fue de 1,39 Gg de CH₄, con una incertidumbre de -41% y +82% valores que coinciden con los de transporte terrestre. La media calculada con valores fijos es de 1,262 Gg de CH₄, es decir un 9,5% menor, esta diferencia al igual que los casos anteriores se debe a la asignación de las FDP y al desarrollo propio de la metodología de Montecarlo.

3.2.3 Óxido nitroso debido a combustión móvil

Al determinar las emisiones de N₂O para transporte terrestre, se obtuvo un total de 0,3794 Gg, este valor y los obtenidos para las diferentes subcategorías se presentan en el cuadro 14. Para todos estos valores se buscó la FDP que se distribuyera de manera similar a los datos, resultando para todos los casos una función lognormal. Este mismo comportamiento siguieron los datos de N₂O para los otros medios de transporte mostrados en el cuadro 15.

En la figura 9 se muestra el comportamiento del total de las emisiones de N₂O por fuentes móviles, el cual es lognormal con una media de 0,379 Gg

Cuadro 14. Emisiones de N₂O e incertidumbres calculadas para las subcategorías de transporte terrestre

Categoría de fuente	Media	N ₂ O (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Automóviles y carros para pasajeros	0,111	0,056	0,225
Camiones para servicio ligero	0,059	0,024	0,142
Camiones para servicio pesado	0,054	0,024	0,141
Motocicletas	0,013	0,0051	0,0347
Equipo especial	0,134	0,054	0,326
Total transporte terrestre	0,379	0,241	0,615

Elaboración propia.

Cuadro 15. Emisiones de N₂O e incertidumbres calculadas para otras subcategorías de transporte

Categoría de fuente	Media	N ₂ O (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Ferrocarril	0,00204	0,00081	0,00492
Transporte Marítimo	0,000245	0,000073	0,000679
Transporte Aéreo	0,00106	0,00037	0,00254

Elaboración propia.

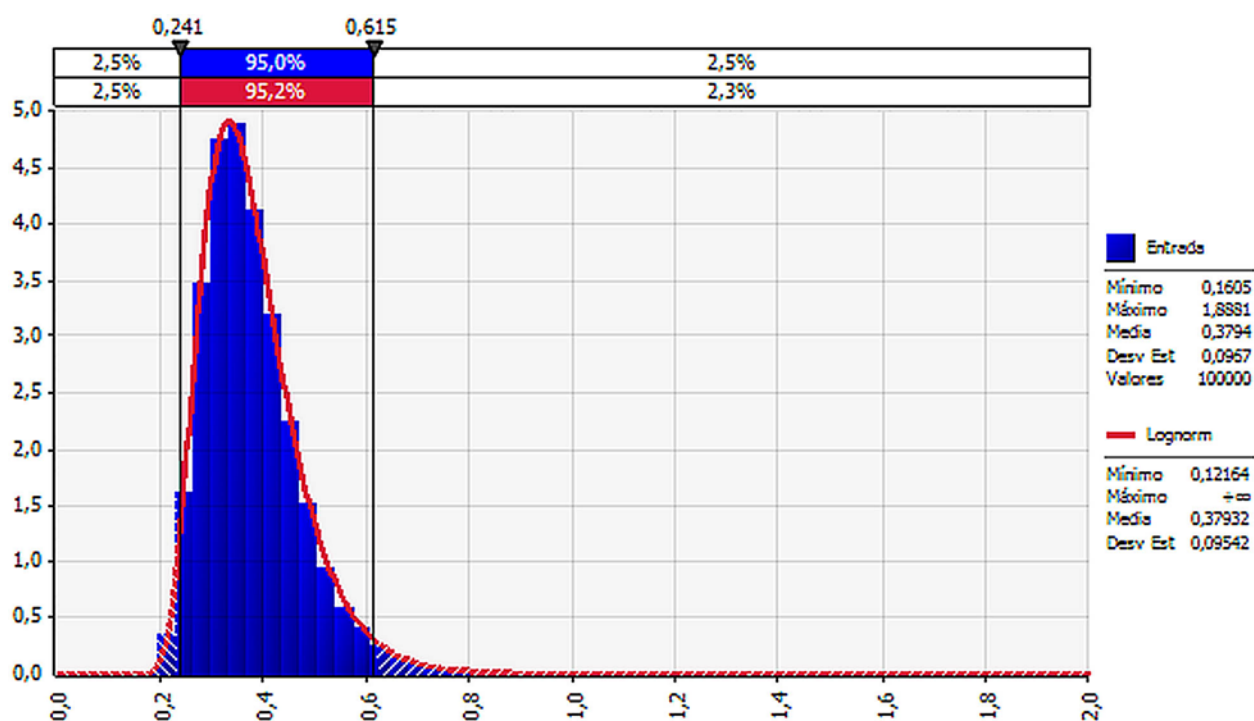


Figura 9. Distribución de los datos de emisiones de N_2O de Combustión móvil.

Cuadro 16. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la función de densidad de probabilidad para emisiones de N_2O equivalente de combustión móvil

Fuente	Media	N ₂ O (Gg)	
		Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	0,379	0,241	0,615
Total ajustado lognormal	0,379	0,241	0,610

Elaboración propia.

e incertidumbres de -37% y +62%, los valores absolutos de ambas bandas se encuentran en el cuadro 16.

3.2.4 Dióxido de carbono equivalente debido a combustión móvil

Las emisiones debidas a la combustión móvil representan un 69,4% del total de las emisiones de CO_2 eq para el sector energético, con una media ajustada de 4.950 y una incertidumbre aproximada de ± 5 Gg. Tal como se muestra en el cuadro 17, las emisiones de transporte terrestre son las que tienen mayor contribución a esta categoría dentro

del inventario nacional, es por esto que se realizó el análisis tanto para transporte terrestre como para el total de las emisiones de transporte, en ambos casos se da un comportamiento normal, tal como se observa en las figuras 10 y 11.

3.3. Total de emisiones del sector energía

En el cuadro 18, se presentan los resultados obtenidos al realizar el agregado total de emisiones por gas para el sector de energía. En este caso, como era de esperar la distribución para CO_2 fue normal, mientras que para metano y óxido nitroso fueron lognormal. Las incertidumbres fueron de

Cuadro 17. Emisiones totales y para combustión móvil expresadas como CO₂ equivalente

Fuente	Media	CO ₂ eq(Gg) Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total transporte terrestre	4.902	4.793	5.021
Total transporte terrestre ajustado normal	4.902	4.788	5.016
Total transporte	4.948	4.841	5.069
Total Transporte ajustado normal	4.950	4.836	5.064

Elaboración propia.

Cuadro 18. Agregado total de emisiones del sector energía por gas para el año 2012

Gas	Media	(Gg) Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
CO ₂	6.867,7	6.758,9	6.978,8
CH ₄	4,78	2,87	8,53
N ₂ O	0,530	0,364	0,801

Elaboración propia.

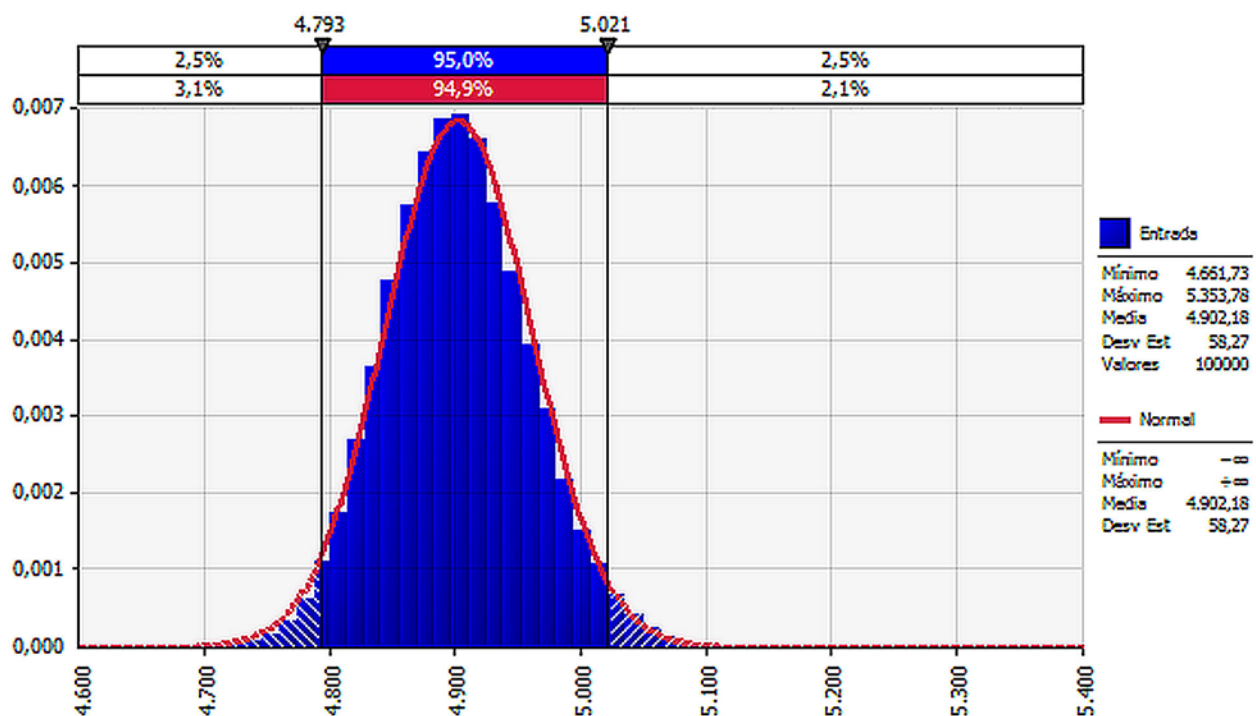


Figura 10. Distribución de los datos de emisiones de CO₂ eq. de transporte terrestre.

Cuadro 19. Resultados de la simulación de Montecarlo y del ajuste de la función de densidad de probabilidad para emisiones de CO₂ equivalente para el sector energía

	Media	CO ₂ eq(Gg) Percentil 2,5%	Percentil 97,5%
Total	7.132	6.996	7.287
Total ajustado Normal	7.132	6.988	7.277

Elaboración propia.

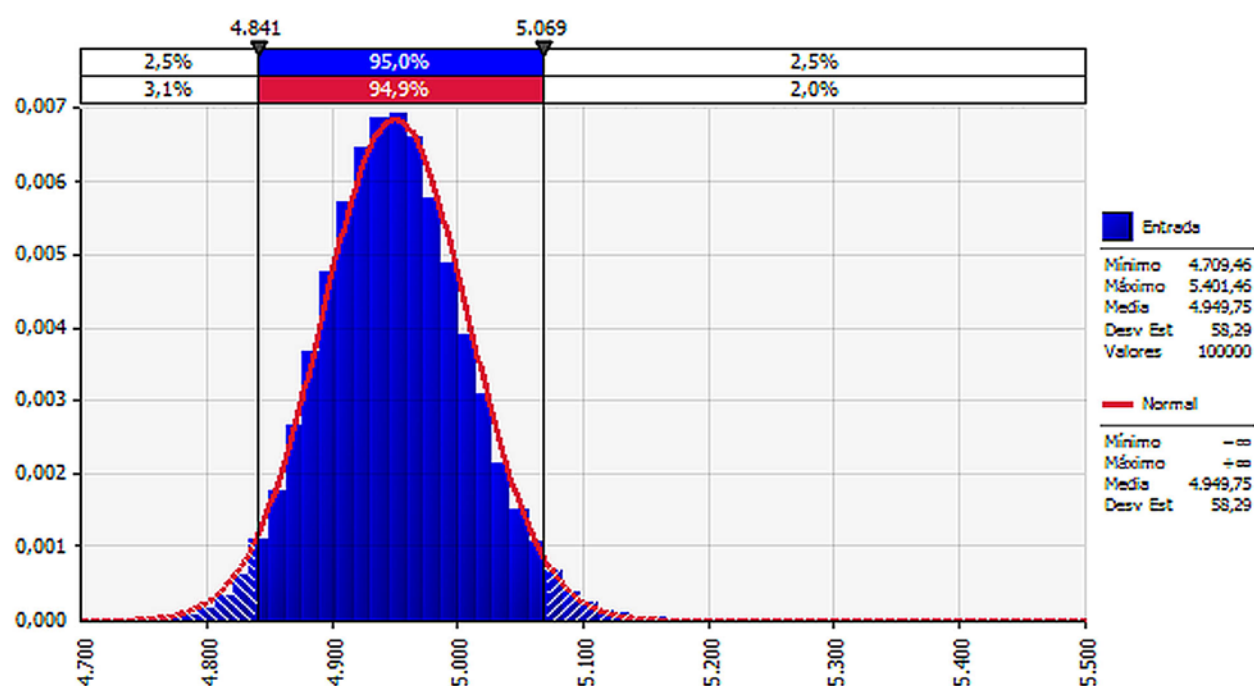


Figura 11. Distribución de los datos de emisiones de CO₂ eq. de combustión móvil.

±1,6% para CO₂, -40% y +78% para CH₄ y -31% y +51% para N₂O.

Por último, se realizó la estimación total de dióxido de carbono equivalente para el sector,

resultando en 7.132 Gg, tanto para los datos simulados como para los ajustados mostrados en el cuadro 19. En la figura 12 se muestra un comportamiento normal de los datos generados, con una incertidumbre total resultante de ±2%.

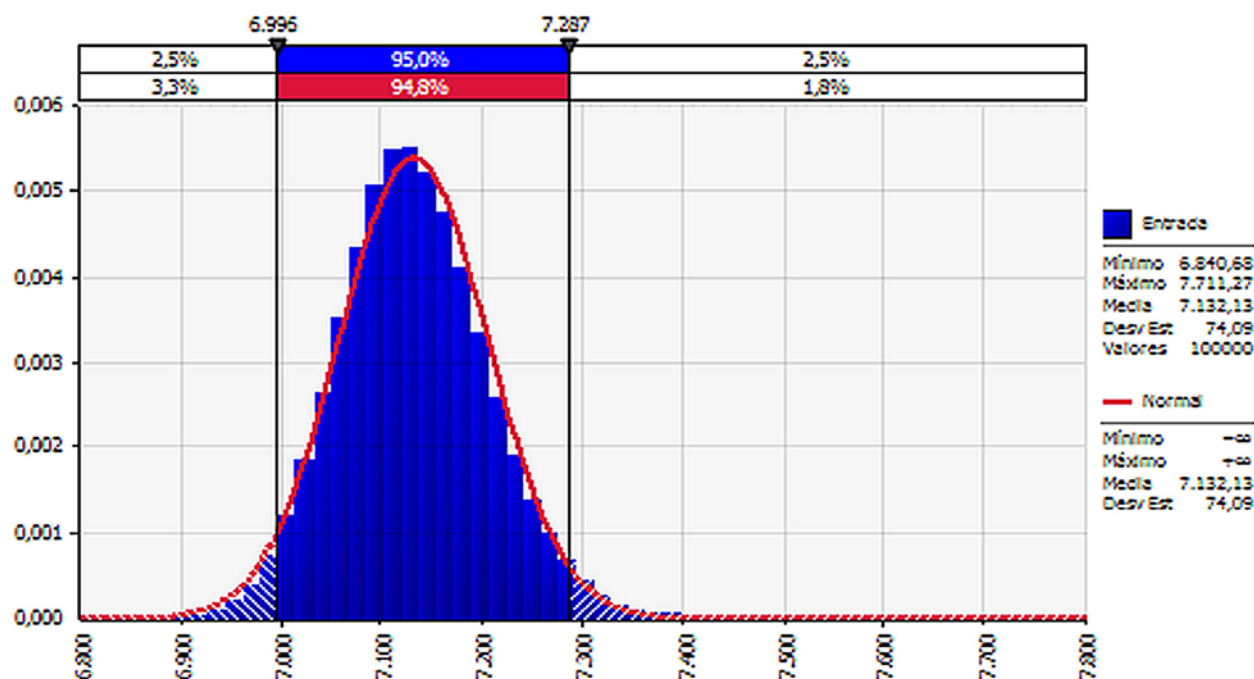


Figura 12. Distribución de los datos de emisiones de CO₂ eq para energía.

En el inventario nacional se reportaron 7.124,8 Gg de CO₂ eq, es decir una diferencia de apenas 7,33 Gg, esto con una incertidumbre de $\pm 3,2\%$, siendo mayor que la calculada con Montecarlo.

4. Conclusiones

Las emisiones totales debidas a la combustión calculadas usando el método de Montecarlo fueron de 7.132 gigagramos de CO₂ equivalente, para el año 2012.

La incertidumbre estimada para el sector fue de $\pm 2\%$, con un ajuste a una distribución normal.

Al utilizar el método de Montecarlo para estimar las emisiones no hubo diferencia significativa con lo calculado para el Inventario Nacional de Emisiones del 2012, siendo las diferencias para el caso de CO₂ menores al 1% y al 10% para CH₄ y N₂O.

Utilizando el método de Montecarlo se tuvo la ventaja de que se pueden combinar incertidumbres asimétricas y obtener resultados satisfactorios, sin hacer suposiciones que puedan inducir a error.

Se recomienda hacer un estudio de los factores de emisión utilizados y las incertidumbres asignadas, para mejorar los procesos de simulación similares en el futuro.

Se recomienda extender este estudio para todo el Inventario Nacional del 2012 y utilizarlo como base en futuros inventarios.

Se recomienda realizar un análisis de tendencia calculando las incertidumbres del inventario de 1990 (año base) con esta metodología.

5. Bibliografía

- Abrahamsson, M. (2002). *Uncertainty in Quantitative Risk Analysis - Characterisation and Methods of Treatment Fire Safety Engineering and Systems Safety*. Division of Fire Safety Engineering, Lund University Centre for Risk Assessment and Management (LUCRAM). Suecia.
- Akaike, H. (1973). *Information theory as an extension of the maximum likelihood principle*. In: Petrov, B.N., Csaki, F. (Eds.). *Second International Symposium on Information Theory*. Akademiai Kiado, Budapest, pp.267–281.
- Chacón, A.R.; Jiménez, G., Montenegro, J.; Sasa, J. y Blanco, K. (2015). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 2012*. MINAE-IMN. San José, Costa Rica.
- Frey, H.C. & Rubin, E.S. (1991). *Development and Application of a Probabilistic Evaluation Method for Advanced Process Technologies, Final Report, DOE/MC/24248-3015, NTIS DE91002095*. Prepared by Carnegie-Mellon University for the U.S. Department of Energy, Morgantown, West Virginia, April 1991. 364p.
- Montgomery, D., Runger, G. (2002). *Probabilidad y Estadísticas Aplicadas a la Ingeniería* (2a. ed) México: Limusa.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2006). *Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. IGES, Japón.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2006). *Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2006). Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. IGES, Japón.
- Snipes, M. Taylor, C. (2014). *Model selection and Akaike Information Criteria: An example from wine ratings and prices*. *Wine Economics and Policy*, 3, 3–9.

Ramírez, A., De Kaizer, C., Van der Sluijs, J.P., Olivier, J. & Brandes, L., (2006). *Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990–2004*. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation. Utrecht, Netherlands.

Winiwarter, W., Rypdal, K. (2001). Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: a case study for Austria. *Atmospheric Environment*, 35, 5425–5440.

Adaptación al cambio climático: un proceso de enseñanza-aprendizaje

JOSE ALBERTO RETANA BARRANTES¹

Resumen

Algunos sistemas naturales presentan evidencias de adaptación a presiones climáticas. Entender el proceso que los ha llevado a adaptarse, es un insumo importante para definir el significado y algunas características elementales de la adaptación ante el cambio del clima. De esta manera se puede mejorar la comprensión de la adaptación de los sistemas humanos. Este conocimiento debe ser transmitido y la plataforma educativa ofrece bases robustas para asegurar que la adaptación es un proceso de enseñanza-aprendizaje. Las dimensiones para ser matemáticamente competente, ajustan perfectamente al esquema de enseñanza de la adaptación. Este planteamiento, es una propuesta para mejorar el diseño de la estrategia de adaptación y la ruta que debe seguir.

PALABRAS CLAVE: ADAPTACIÓN, SISTEMAS, ENSEÑANZA-APRENDIZAJE, CAMBIO CLIMÁTICO, EDUCACIÓN.

Abstract

Some natural systems present evidence of adaptation to climatic pressures. Understanding the process that has led them to adapt, is an important input to define the meaning of adaptation to climate change. This knowledge must be transmitted and the educational platform offers robust bases to ensure that adaptation is a teaching-learning process. From this approach, the design of strategies can count on a clear route.

KEY WORDS: ADAPTATION, SYSTEMS, TEACHING-LEARNING, CLIMATE CHANGE, EDUCATION.

1. Introducción

El planeta Tierra puede ser conceptualizado como un sistema. Pascual (2013), lo define como un complejo de elementos interactuantes, donde muchas veces las interacciones son más importantes que las características de los mismos elementos que lo componen.

Nuestro planeta se puede explicar a partir de la interacción de tres subsistemas básicos: la litosfera que es la porción sólida del planeta, representada principalmente por la corteza terrestre y los grupos minerales subyacentes; la hidrosfera que es el subsistema que involucra el

agua en su estado líquido y sólido, representada por las masas de agua y de hielo; y la atmósfera que corresponde con la porción gaseosa y normalmente se interpreta como “el aire” que respiramos. Desde el punto de vista sistémico, una alteración de alguno de los subsistemas, afectará directa o indirectamente los otros.

La biosfera es el conjunto de todas las formas de vida del planeta y de alguna manera expresa en su forma, extensión y comportamiento las interacciones entre los subsistemas antes mencionados. La vida en la Tierra tiene una estrecha dependencia de las interacciones entre la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera. Mediante

1 Ing. Agrónomo. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: jretana@imn.ac.cr

estas interacciones la biosfera asegura su permanencia, sostenibilidad, evolución y forma.

Por ejemplo, una sequía atmosférica es un agente transformador del medio físico, que no solo erosiona el paisaje, sino que distribuye los cuerpos de agua en un mosaico que debe ser interpretado, asumido e incorporado por los organismos que dependen de esta relación sistemática y que no pueden huir de su entorno. Esta es la forma histórica en que la vida del planeta se ha tejido a lo largo del tiempo, creando vaivenes de especies exitosas y adaptadas o efímeras, que sucumben ante los cambios.

El actual calentamiento global de origen antropogénico, supone como una de sus mayores consecuencias, un cambio paulatino de las características de nuestra esfera gaseosa. Los cambios que se produzcan en ella afectarán también la hidrosfera y la litosfera. La biosfera tal y como la conocemos actualmente, también se verá afectada, por lo que se vislumbran cambios en el sistema climático que van a condicionar algunas formas de vida del planeta.

Este marco conceptual de causa y efecto, enfrenta a la civilización moderna ante uno de los mayores retos de planificación y gestión que se hayan realizado a lo largo de la historia de la humanidad, que es crear las bases para la adaptación de los sistemas tanto naturales como artificiales, ante el cambio de clima. Se debe de trazar la mejor ruta para organizar y llevar adelante la iniciativa que logre objetivos claros en el corto, mediano y largo plazo. Es todo un proceso de organización estratégica de la sociedad, para que logre transformar su forma de pensar, producir y relacionarse con el ambiente.

Estas características hacen del tema de la adaptación ante el cambio climático, un eje transversal en toda la cultura que el ser humano debe desarrollar a partir de ahora. La forma más exitosa que la historia ha conocido sobre

la transmisión cultural, se dibuja a partir de la plataforma educativa. Por medio de la educación es posible planear, trazar y potenciar la ruta más coherente por donde los seres humanos deben pensar, advertir y crear. Aun cuando se tenga alguna idea del método técnico-administrativo que debe de accionar la adaptación; todo aquello que tenga que ver con el diseño, proceso, evolución y evaluación, debiera de ser conceptualizado como un proceso de enseñanza y aprendizaje.

2. Metodología

Esta es una investigación con enfoque cualitativo y que se realiza de forma descriptiva, sumando la mayor cantidad de características posibles para explicar el concepto de adaptación ante el cambio del clima y proponer una ruta lógica para organizar las acciones que se deben de emprender. Se presenta información de fuentes secundarias con el objetivo de apoyar la perspectiva que se presenta sobre el tema.

3. Resultados

3.1. La educación como medio: sin memoria no hay adaptación

Acumular experiencias, aprender de ellas y enseñarlas a las nuevas generaciones es el mejor mecanismo que los seres vivos han incorporado a sus rutinas para adaptarse a condiciones difíciles y cambiantes. La flora y fauna transmiten esas experiencias por medio de la descarga genética y el condicionamiento de conductas, de forma lenta y pausada. En el caso del ser humano, los procesos de enseñanza-aprendizaje permiten transmitir un cúmulo de conocimientos que puede facilitar a las generaciones futuras el diseño de la ruta de la adaptación comunitaria, sectorial o de un país completo como si fuese un sistema. Esta ruta ha logrado formar y transformar la sociedad.

La transmisión del conocimiento por medio de procesos de enseñanza y aprendizaje son la base de la ciencia educativa. Si la adaptación social y productiva ante la amenaza del cambio de clima se traslada a la esfera educativa y se diseña como parte de sus procesos, se avanzará indudablemente en el entendimiento de lo que significa realmente la adaptación.

No existe adaptación sin memoria, así como no puede haber aprendizaje sin algo que enseñar y sin un mecanismo de registro de experiencias. La observación, el acúmulo de experiencias y la documentación son básicos. Es necesario crear la memoria que se va a transmitir a las siguientes generaciones por medio de la enseñanza.

Como no había sucedido antes en la historia de la humanidad, actualmente se cuenta con un gran banco de información y análisis que advierte sobre escenarios de clima futuro amenazantes para la vida del planeta. La advertencia está dada, pero no basta solo transmitirla, hay que incorporarla al pensamiento y a la acción.

3.2. La adaptación autónoma de flora y fauna como enseñanza

Observar un campo floreado puede ser un ejercicio académico, más allá del disfrute del paisaje. Detrás de esa escena, se descubre todo un plan regulador de energía y un proceso de adaptación de los organismos al clima. La flor es la respuesta evidente de un período reproductivo (flor, fruto, semilla, nueva generación), indica la preservación de la especie y por lo tanto, “descubrir” el momento oportuno para florear es de vital importancia. Obedece a un conjunto de información registrada y transmitida de generación en generación, para asegurar la permanencia de la vida en el transcurrir del tiempo. El proceso fisiológico que impulsa la floración está en sincronización con la temperatura (energía necesaria para cambiar de fase), radiación (luminosidad necesaria

para el proceso fotosintético y acumulación de fotoasimilados), viento (agente polinizador), humedad (hidratación ambiental de tejidos delicados) y lluvia (primera fuente de agua). Una flor silvestre es una carta climática procesada que habla de las condiciones climatológicas a las cuales se adaptó una planta.

La observación es el primer paso en la acumulación de conocimientos para ser luego transmitidos. En este sentido, observar y comprender cómo se han adaptado las especies a su entorno, es una clase de enseñanza que se debe valorar.

El clima es dinámico, su línea evolutiva está marcada por oscilaciones, desviaciones, tendencias, extremos, variabilidad y cambios. Adherida a esa línea dinámica, el tejido de la vida a lo largo de la historia ha tenido que regular su biomasa, su rendimiento, su morfología, su fisiología y su comportamiento. Así como el clima es dinámico, la expresión de la vida también lo es; las diferentes formas de vida del planeta están entrelazadas al clima que las presiona, las regula y las transforma. El clima y la vida deben de ser leídos e interpretados a lo largo de esa línea de tiempo oscilante, que cambia incansablemente. Nada es estático, todo evoluciona, se podría decir que un ser vivo actual es la expresión momentánea de una forma de vida adaptada a las condiciones ambientales que la han normado por siglos. Aquellos organismos que no se adaptan al clima, migran o sucumben, los organismos que se adaptan al clima se transforman, se fortalecen y se establecen.

Las respuestas de las plantas y animales a condiciones de temperatura, humedad, radiación, brillo solar, precipitación o viento, son parte de la adaptación al clima del cual el organismo es originario (De la Cruz, et al. 2010). La tasa fotosintética y de respiración, el termotropismo y fototropismo, elongación o contracción de órganos, supresión de fases, protecciones de la superficie en contacto con la atmósfera, morfología y

densidad de hojas, coloración general, regulación de biomasa, porte, letargo en ciertas fases de desarrollo, modificaciones radiculares, entre muchas otras, son parte de estas respuestas al medio en busca de la adaptación. Algunos puntos clave que se desprenden de las experiencias de adaptación ocurridas en especies de flora y fauna y que pueden dirigir el pensamiento de la adaptación del ser humano ante el actual cambio climático son los siguientes:

3.2.1 La adaptación ha sido un proceso lento y oscilante

Examinando procesos de adaptación de especies animales y vegetales a su medio, se puede concluir que la adaptación es un camino sin frontera, que lleva un paso lento y oscilante. No se puede pretender tener éxito en una adaptación autónoma (aquella que obedece a la reacción primitiva) en el corto plazo, ni se puede esperar que todos los mecanismos que el organismo utilice para adaptarse den resultados positivos a lo largo del proceso. Es una forma de evolución, donde el clima es el factor estresante y la respuesta es el intento de adaptación. Al cabo de muchas generaciones, se obtiene un nivel de éxito en la adaptación climática y solo aquellas especies que logren niveles importantes de éxito y lo puedan reproducir, continuarán multiplicándose bajo las presiones ambientales que el clima suscite.

La adaptación de especies es un tema generacional, por eso es de paso lento. De hecho, tal y como lo reconoce León (2012), algunas plantas estresadas por situaciones climáticas sacrifican su generación y aceleran la fase fenológica reproductiva con la intención de que la nueva generación pueda emerger rápido y busque una nueva oportunidad de éxito productivo bajo la condición de estrés. Algo semejante se ha observado en poblaciones de Langostas (*Schistocerca*, sp), que buscan ovopositar todo su potencial durante condiciones extremas de clima con el fin de asegurar grandes

poblaciones y una mayor probabilidad de subsistencia de algunas de ellas (Retana, 2000). Entienden que lo importante es salvar la especie y no su generación actual.

3.2.2 La adaptación ha sido integral al cambio

Otro aspecto importante de la adaptación climática exitosa que se refleja en las experiencias de flora y fauna, es la integralidad del cambio. Si bien es cierto que el cambio puede obedecer a un estímulo específico (por ejemplo temperatura ambiental), las respuestas adaptativas serán integrales al medio. Esto significa que los cambios provocados por la temperatura (en este ejemplo) le permitirán al organismo no solo evitar salir de su zona de confort térmico, sino que se crearán una serie de mecanismos que le permitirán hacer un mejor uso de las fuentes energéticas (alimentos), adaptar las relaciones con otros organismos (simbiosis) y el aprovechamiento de oportunidades (depredación, ausencia de parásitos, comunicación, corredores de desplazamiento), entre muchas otras interacciones con el entorno.

El mecanismo o la respuesta ante la presión no solo favorecen el retorno a condiciones de confort ambiental para el organismo, sino que potencian las oportunidades paralelas que se produzcan en el propio hábitat. La evolución del pingüino, desde un ave voladora-sambullidora, hasta un ave no voladora pero marina, evidencia no solo una transformación para lograr sobrevivir en un ambiente extremo, sino para aprovechar los recursos y relaciones que se encuentran en su medio (Aguello-Lobo, s.f.).

3.2.3 La adaptación ha sido una respuesta autónoma profunda.

Los procesos de adaptación al clima que se observan en especies de flora y fauna actuales,

son naturales, se dan por reacción y han formado parte de la selección de especies y la evolución de aquellas altamente resilientes. Para que esto ocurra, las respuestas y cambios posteriores deben ser profundos y transformadores. Como ya se mencionó, se entiende la adaptación natural dentro de una dinámica de paso lento que exige cambios generacionales a largo plazo. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático califica este tipo de adaptación como autónoma (IPCC, 2001) y puede decirse que es inherente a los organismos.

Cuando los sistemas naturales son impactados por eventos extremos de rápida evolución pero cuyos efectos se sostienen en el tiempo, pueden presentarse mecanismos de reacción que luchan activamente con la presión con el fin de evitar o reducir daños. Si el evento extremo puede ser percibido antes de su impacto, se pueden desplegar incluso mecanismos preventivos (huida, migración, desplazamiento, enfrentamiento preparado o retroceso). La reacción y la prevención son la base de los procesos de adaptación autónoma en el largo plazo.

De acuerdo con De la Cruz, et al. (2010), los mecanismos de adaptación de las plantas a su medio son de dos tipos: respuestas fisiológicas y morfológicas. Las fisiológicas se relacionan al funcionamiento de órganos y tejidos, por ejemplo, el estímulo climático o meteorológico produce una señal interna que promueve cambios celulares. Entre los compuestos responsables de la transmisión de dicha señal se encuentran las fitohormonas, cuya acumulación induce a la síntesis de proteínas que promueven la tolerancia al daño producido por el agente externo (en este caso el clima). La modificación del patrón de crecimiento, la eliminación de órganos dañados, la reducción del potencial hídrico de los tejidos mediante la fabricación de compuestos osmoprotectores, la degradación y reparación de proteínas, así como la síntesis de proteínas

protectoras, son parte de las variaciones que procuran aminorar el daño por estrés.

En cuanto a las respuestas morfológicas, son los cambios en las formaciones vegetales, de modo que éstas desarrollan características que las hacen más aptas para las condiciones del medio. Por ejemplo, los cambios en los tonos y los colores pueden deberse al aprovechamiento de las diferentes longitudes de onda de una radiación dada. La cutícula serosa o absorbente es un indicativo de la dinámica hídrica con el ambiente; el porte y densidad de hojas se relaciona con el viento, la presión atmosférica y la disponibilidad de CO₂. El número estomático se asocia con extremos secos y temperaturas altas (De la Cruz, et al., 2010).

En el caso de los animales, los mecanismos de adaptación al medio pueden ser morfológicos, fisiológicos y/o conductuales (cambios en el comportamiento grupal). El color del pelaje y la densidad se relaciona con la temperatura ambiental, la radiación y el viento. Cambios fisiológicos que controlan la ingesta y la hidratación, pueden estar condicionados por la oferta alimenticia y la carga energética del ambiente (temperatura y radiación). Los cambios conductuales como la agrupación del rebaño en busca del calor corporal también son mecanismos de adaptación a condiciones ambientales estresantes.

3.2.4 La adaptación es exitosa solo si se reproduce

Los ejemplos de procesos adaptativos suelen resultar exitosos y fácilmente observables en aquellos grupos poblacionales con altos índices reproductivos, ciclo corto y rusticidad, como algunas especies de insectos. Estas características permiten obtener muchas generaciones en poco tiempo, por lo que el componente genético asociado a la fenología, se podrá fortalecer en

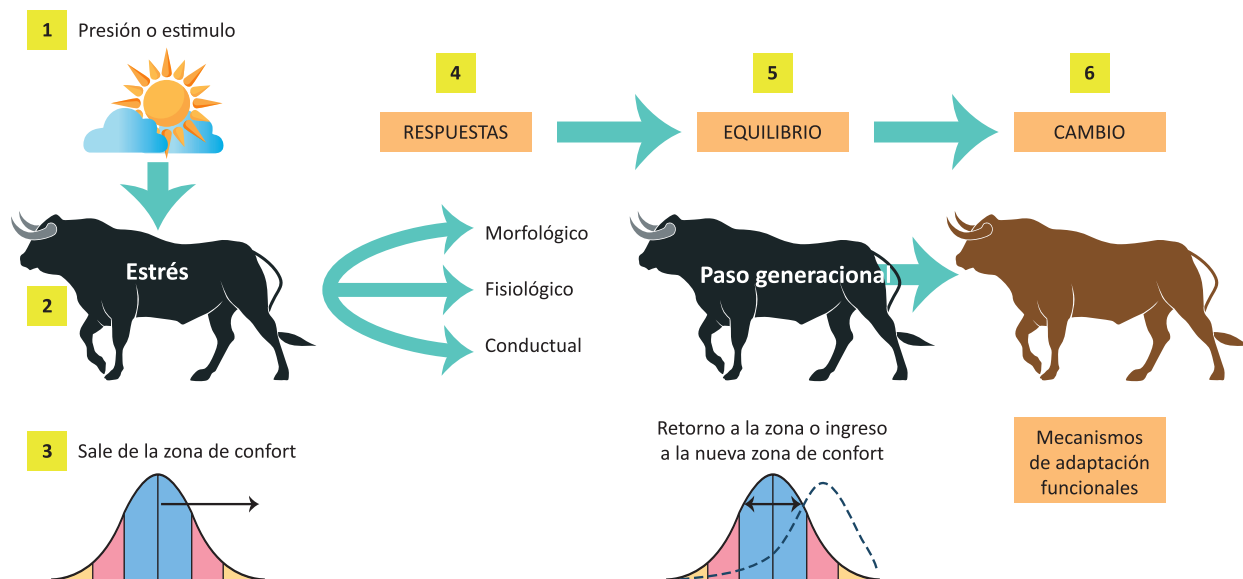


Figura 1. Adaptación de las especies ante presiones climáticas.

1. Los eventos extremos atmosféricos o la presión progresiva del cambio climático constituyen la presión sobre el sistema. 2. El sistema entra en estrés. 3. El sistema tiende a salir de su zona de confort. 4. El sistema reacciona con cambios morfológicos, fisiológicos o conductuales. 5. Las respuestas son efectivas en su mayoría y contribuyen a que el sistema vuelva a las condiciones de confort reestableciendo el equilibrio. Es posible también que el equilibrio original no se reestablezca, pero el sistema se ajuste a un nuevo rango de confort. 6. A lo largo del tiempo, con respuestas efectivas se van generando cambios a nivel morfológico, fisiológico o conductual, que consiguen finalmente la adaptación ante un nuevo patrón atmosférico.

el corto y mediano plazo. La carga genética le permitirá a los organismos soportar mejor la presión de la variabilidad del clima en relación con su zona de confort. Es por este motivo que la reproducción y esperanza de vida de las nuevas generaciones, son factores primordiales para los cambios en el largo plazo.

Las plantas y los animales pueden reaccionar mecánica o fisiológicamente ante situaciones de estrés climático. Cuando un organismo es conducido fuera de su zona de confort y el ambiente lo lleva progresivamente a sus umbrales críticos, se desencadenan una serie de reacciones en procura de mantener el equilibrio. Si estas situaciones de estrés son repetitivas pero no son letales, las modificaciones permitidas se acumulan en el tiempo y se hacen cada vez más evidentes al paso de las generaciones (figura 1). La adaptación normalmente sugiere un paso lento, progresivo,

donde se sincroniza el estímulo climático con una reacción o respuesta, la reacción con un equilibrio, el equilibrio con un cambio y el cambio a lo largo del tiempo se convierte en adaptación.

3.3. Adaptación "matemáticamente" competente

De acuerdo con lo expuesto hasta ahora, la experiencia de adaptación de los sistemas naturales a su medio muestra cuatro características importantes que deben de ser tomadas en cuenta en el entendimiento de la adaptación:

- Son procesos lentos y oscilantes, de presión-respuesta.
- Son integrales al cambio.
- Son transformaciones profundas.
- Son exitosas solo si logran reproducirse.

Estos puntos son básicos en la comprensión de lo que significa el proceso de la adaptación. Para poderlas transmitir, existe una plataforma conceptual educativa interesante y aplicable al aprendizaje de la adaptación: dimensiones para ser matemáticamente competente. De acuerdo con García (2011) citando a Moya (2007), la competencia es la forma en que una persona moviliza y utiliza todos sus recursos para resolver una tarea en un contexto determinado, integrando capacidades, contenidos y métodos, con el fin de desarrollar destrezas y valores. Ser matemáticamente competente, es por tanto, aprender y utilizar racionalmente ese conocimiento con fines de desarrollar capacidades para el uso de la matemática en la vida práctica. Un aspecto fundamental de este planteamiento, es que ser competente en el uso racional de una herramienta no es el fin, sino que el objetivo es el desarrollo de capacidades y valores. Este es un aspecto humano definido para la construcción de una mejor vida en sociedad.

Volviendo a la técnica, Linaris (2003) identifica cinco diferentes dimensiones para ser matemáticamente competente:

- Conceptual: comprender la verdad, entender el concepto (por ejemplo adición).
- Procedimental: comprender el método, cuándo y cómo usarlo (por ejemplo, la suma).
- Uso de estrategias: identificar estructuras comunes en procesos diferentes (resolver problemas de adición de unidades por medio de la suma).
- Comunicativo: explicar por qué se eligió el método y defenderlo (enseñar el proceso de la suma a otros).
- Aptitud: gustar de la realización y sentir seguridad (desarrollar capacidad).

Tomando de guía estas cinco dimensiones, se pueden identificar grandes líneas de un proceso de enseñanza y aprendizaje sobre el tema de la adaptación ante el cambio de clima.

Cuadro 1. Aplicación de las dimensiones para ser matemáticamente competente al proceso de enseñanza-aprendizaje de la adaptación ante el cambio climático

Dimensiones para lograr la competencia matemática	Aplicación de las dimensiones para definir objetivos que se apliquen a un marco de enseñanza y aprendizaje de la adaptación ante el cambio climático	Puntos clave de adaptación natural que se pueden cubrir con las dimensiones	Capacidades a desarrollar en el proceso de enseñanza aprendizaje
1. Conceptual	Definir y comprender el concepto y la verdad sobre cambio climático y adaptación de sistemas	Procesos lentos y oscilantes de presión-reacción	Conocimiento
2. Procedimental	Identificar diferentes métodos y enfoques propuestos para adaptar los sistemas (adaptación integral, basada en ecosistemas, urbana, autónoma, planificada, entre otros)	Buscar métodos integrales al cambio que puedan lograr transformaciones profundas en el sistema	Planificación y ejecución
3. Uso de Estrategias	Definir objetivos a alcanzar con la adaptación y la ruta lógica que se debe seguir en el corto, mediano y largo plazo, según el método elegido.		Pensamiento lógico y gestión de riesgos
4. Comunicativo	Multiplicar, defender y enseñar la idea sin dejar de ser autocrítico y evaluador de las experiencias.	Reproducción exitosa de experiencias y transmisión generacional	Autoanálisis y evaluación
5. Aptitud	Desarrollar capacidades, destrezas y valores.		Seguridad

Elaboración propia.

El objetivo de este proceso sería entonces desarrollar destrezas y valores con el fin de que una generación sea capaz de utilizar los conocimientos sobre adaptación y transmitirla a las generaciones siguientes. Este proceso debe crear una transformación cultural tan profunda, como la presión climática que está soportando el sistema. Es construir y transmitir un proceso de cambio cultural a partir de la enseñanza.

En el cuadro 1 se resumen las valoraciones de las cinco dimensiones de un proceso de enseñanza-aprendizaje de la adaptación.

3.4. Tipos, enfoques y recursos de gestión de la adaptación en los sistemas humanos

Para el IPCC (2014), la adaptación se define como los ajustes de los sistemas humanos o naturales frente a entornos nuevos o cambiantes. Son respuestas a estímulos climáticos proyectados o reales, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. Además, el IPCC define la capacidad adaptativa al clima, como la facilidad para ajustarse a la variabilidad, eventos extremos y al cambio climático con el fin de moderar los daños, aprovechar las consecuencias positivas y soportar las consecuencias negativas.

A partir de esta definición, el IPCC identifica diferentes tipos de adaptación como son: la preventiva (medidas tomadas antes del evento), la reactiva (medidas para enfrentar el evento), la pública (iniciativas de los gobiernos y estados), la privada (iniciativas de la empresa particular y privada), la autónoma (natural) y la planificada (gestionada a partir de procesos de planificación).

Surgen luego múltiples enfoques de la adaptación, por ejemplo la que se basa en el fomento de capacidades adaptativas, que pretende desarrollar fortalezas antes que poner en marcha adaptaciones tecnológicas específicas.

Idealmente, se mejora la capacidad adaptativa de una población al mismo tiempo que se diseñan e implementan adaptaciones particulares (Stratus Consulting, 2004).

Bajo ese mismo enfoque, nacen la adaptación basada en las comunidades (AbC) (CARES, 2015) y la adaptación basada en ecosistemas (AbE) (Lhumeau y Cordero, 2012), ambas buscan mejorar las capacidades locales, sin embargo, la segunda al utilizar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, resulta ser una estrategia más amplia. El enfoque integrado pretende anexar el desarrollo a la adaptación. Se debe asegurar tanto que el desarrollo incluya la adaptación al cambio climático, como que la adaptación sea coherente con las prioridades de desarrollo (Street, 2007).

Otros enfoques se dirigen a la gestión de recursos. Por ejemplo, la adaptación basada en la gestión hídrica que nace para ser aplicada en países que experimentan déficits de lluvia por situaciones de variabilidad climática, sin embargo, se ha popularizado recientemente y su enfoque es muy utilizado en la actualidad. Enfocan el cambio de clima como un problema de oferta, disponibilidad y manejo de agua (ONU, 2005).

También está la adaptación basada en la gestión del riesgo climático, que se consolida en este siglo pero tiene sus raíces en la aplicación de seguros agrícolas ante eventos extremos del clima que surgen en la segunda mitad del siglo XX. Esta pretende identificar zonas y grupos poblacionales en riesgo de ser impactados negativamente ante eventos extremos, variabilidad y cambio climático (Retana et al, 2017).

Otra es la adaptación basada en la gestión de la infraestructura, que es un abordaje que busca aumentar la capacidad de adaptación de las obras de infraestructura que juegan un papel determinante en el desarrollo económico, por medio de la gestión de procesos de diseño que contemplen riesgo y períodos de retorno más

amplios (DNP, 2012). Además, actualmente es posible encontrar múltiples enfoques y tipos de adaptación: urbana, estructural, integral, sectorial, sistémica.

3.5. Replantando el concepto de adaptación en los sistemas humanos

Cualquiera que sea el enfoque o el tipo de adaptación, es necesario revisar el concepto del que parten las acciones. La definición propuesta por el IPCC, establece que la adaptación es un “ajuste” de sistemas frente a un entorno nuevo o cambiante, sin embargo, como lo reconoce (Stratus Consulting, 2004), la adaptación se debe distinguir de un simple ajuste a las nuevas condiciones. La adaptación significa un cambio fundamental de un sistema a una condición futura distinta de la presente, de forma tal que se pueda amoldar mejor al nuevo patrón climático. Además, de acuerdo con lo observado en la experiencia adaptativa de sistemas naturales, los cambios han sido profundos y generacionales.

Ahora bien, es posible que las primeras respuestas de los sistemas humanos sean sencillas y obedezcan a pequeños ajustes que intenten moderar los daños sufridos, pero la historia dicta otra situación: la adaptación exige plantear y realizar transformaciones en el largo plazo y que al final no moderan daños sino que amoldan comportamientos. Por ejemplo, el tipo de energía que debe mover la economía y el desarrollo de las comunidades debe de ser limpia desde el punto de vista ambiental. Eso no es un ajuste, es una transformación profunda, costosa y necesaria. No solo es mitigación, es adaptación. El planteamiento de tal reto no debe tener como objetivo disminuir pérdidas, sino que debe de considerarse como un mejor aprovechamiento de recursos en un marco de menor deterioro al ambiente y una mejor convivencia. Fomentar cambios basados en la disminución de daños provocados por eventos hidrometeorológicos extremos, tiene el riesgo

de permitir la contaminación ambiental por los sistemas humanos hasta que no se reporten pérdidas por eventos naturales. Adaptación es conciencia. Se exige una transformación profunda de la forma en que el ser humano, utiliza, convive e impacta el ambiente. Los cambios tecnológicos deben estar acompañados de un cambio conductual que impregne la cultura de los pueblos, de lo contrario, la reproducción de las experiencias no será exitosa.

CARES (2015), plantea la interrogante sobre si las acciones de adaptación que se están emprendiendo en la actualidad son realmente nuevas. Obras de infraestructura, intervención de cuencas, agricultura orgánica, cosecha de lluvia y traslado de pueblos, entre muchos otros, son acciones que tienen un amplio cartel adaptativo y una historia vieja. Han surgido al paso de los impactos de eventos extremos y variabilidad climática, pero actualmente son aplicables a la visión del cambio climático solo por el componente de adaptación. Concuerdan con lo propuesto por el IPCC en el sentido de que son “respuestas ante estímulos climáticos” y son creadas para “moderar daños”. Sin embargo, no necesariamente responden a la adaptación.

Volviendo al planteamiento de la competencia matemática, las dimensiones 3, 4 y 5 conforman lo que se conoce como el declaratorio. Este se da cuando el método que se eligió obedece a una estrategia, cuando la idea se multiplica y se defiende y sobre todo cuando se transmite con seguridad, desarrollando capacidades y valores. Todo esto habla de un proceso, de una reflexión crítica, de una evaluación y una práctica sostenible. En este sentido, muchas acciones de adaptación que tienen excelentes resultados, duran mientras duren los fondos del proyecto, mientras los líderes comunales aún vivan, o mientras no se cambie de gobierno. En ese sentido son cortoplacistas, no se reproducen ni se transmiten. No hay “declaratorio” en ellas. Son formulaciones de un proyecto que no planteó nunca su sostenibilidad y sustentabilidad.

La adaptación es una estrategia de vida y sobrevivencia, donde la generación actual toma una decisión y sus experiencias (buenas y malas) son transmitidas a la generación futura porque se sabe que son importantes. Trascienden las personas. La adaptación no tiene frontera. El saber y el saber hacer se juntan, se transmiten, se enseñan a una generación nueva.

Por lo tanto, la adaptación debe expresar en su concepto algo más que una respuesta ante un estímulo para moderar un daño. La definición del IPCC pierde la noción de transmisión, de perdurabilidad, de esa ruta que una vez emprendida no se puede abandonar.

Por ejemplo, la documentación sobre planes de atención de sequía en ciertas zonas de Costa Rica, son abundantes. En el Pacífico Norte están ampliamente reconocidas y asociadas históricamente al evento El Niño, sin embargo, los sectores productivos, salvo algunas actividades agropecuarias, adolecen de verdaderas estrategias de acción para atender un evento que es aperiódico pero recurrente. La respuesta no es sistemática, ha sido reaccionaria y ha servido solo para atender el evento momentáneo. Los Decretos de Emergencia que normalmente se asocian a este tipo de respuesta, solo intentan destinar recursos para atender la eventualidad del momento, pero no para fortalecer sistemas y desarrollar capacidades. Como bien lo apunta Street (2007), no estamos tan bien adaptados como deberíamos a la variabilidad climática actual. La forma de reacción pública y privada que ha imperado en Costa Rica a la hora de atender los eventos hidrometeorológicos extremos, sobre todo la sequía, no es una guía de adaptación, en el tanto que en su mayoría han sido respuestas sin estrategias a largo plazo y sin consideraciones de evaluación o reproducción.

Volviendo a la definición del IPCC, se dice que las acciones son tomadas para moderar los daños. La teoría de la gestión de riesgos lo indica, la

vulnerabilidad debe ser tratada para disminuir el impacto de amenazas y crear resiliencia, pero ¿qué sucede cuando no se pueden moderar los daños? La huida es una acción válida y naturalmente es la primera acción de sobrevivencia, pero el ser humano perdió esa habilidad. La retirada, la migración, el movimiento, la evacuación son respuestas instintivas, naturales para sobrevivir, no necesariamente moderan un daño, más bien representan un alto costo.

Una acción que se emprenda para enfrentar un evento hidrometeorológico extremo no necesariamente va a sacar de la pobreza a una comunidad, tampoco va a disminuir su vulnerabilidad, ni es fuente de desarrollo. Sin embargo, esa acción costosa puede significar la vida de una generación y la seguridad para la siguiente, o simplemente fortalece su cultura histórica, lo cual también es válido.

Wilchez (2011), en alusión a las comunidades anfibias del Caribe Colombiano, menciona que “la adaptación al cambio climático, debe enfocarse a fortalecer las características anfibias de las comunidades del Caribe y todos los rasgos culturales que se derivan de allí, en lugar de intentar “enseñarles a vivir” con parámetros andinos”. El indígena actual de Latinoamérica acumula una historia milenaria de adaptación, con mecanismos agrícolas y sociales que han sido reconocidos como exitosos en su adaptación al medio. Las comunidades anfibias de la amazonia y las indígenas en general, guardan en su pobreza una riqueza cultural que las ayuda a sobrevivir ante situaciones extremas, donde otra cultura de mayores recursos no podría hacerlo.

La adaptación ante el cambio de clima es un proceso de enseñanza-aprendizaje, que elige una ruta estratégica la cual persigue transformar la relación entre el ser humano y el clima. El proceso que se inicia debe conducir progresivamente a una mejor convivencia entre los sistemas humanos y su ambiente, respetando los rasgos y la historia

cultural de las poblaciones, así como la estabilidad y la evolución del entorno donde se desenvuelven.

Es un proceso de enseñanza-aprendizaje porque conduce progresivamente hacia un cambio cultural a largo plazo. No es un impulso que pueda responder solo a una generación, sin contemplar su transferencia a la siguiente y su permanencia en la lectura cultural de los asentamientos humanos. Debe ser planificada porque exige un ejercicio de gestión con todas las herramientas de organización que se dispongan. Es una ruta estratégica porque los programas, planes y acciones que se diseñen, deben de buscar un objetivo planificado, ligado, coordinado y coherente con la realidad particular de los grupos humanos. Esta ruta debe conducir a la reivindicación del ser humano como cohabitante del planeta.

3.6. Puntos básicos en el diseño de una estrategia de adaptación

La especie humana ha demostrado a lo largo de su historia una alta capacidad adaptativa al clima, su variabilidad y su cambio. Prácticamente se ha hecho presente exitosamente en todos los tipos de clima del planeta, en forma sedentaria, nómada o en tránsito. Además, ha podido hacer frente a variaciones extremas del clima en el corto y mediano plazo. Sin duda la capacidad en cuanto a la acumulación de experiencias y el traslado de ellas a nuevas generaciones, y su enorme poder constructivo y creativo, son parte de un arsenal único en la naturaleza. Sin embargo, a pesar de esta reconocida capacidad de adaptación, hay evidencia de que cambios abruptos en el clima han sido detonantes de procesos de colapso y dispersión de civilizaciones enteras (Manzanilla, 1997; Acosta, 1997 y Lal, 2011).

Por lo anterior, es necesario que los sistemas humanos emprendan procesos de adaptación planificados y sistematizados, con el fin de que pasen a formar parte del pensamiento productivo

de generaciones futuras. Se puede tener una mayor probabilidad de éxito en la adaptación a partir del conocimiento, su traducción en acciones y su transmisión generacional por medio de la plataforma educativa.

Algunos puntos clave para diseñar un proceso de adaptación son:

- a) Es necesario elegir un escenario de cambio climático futuro y definir un horizonte de tiempo coherente para la planificación que se busque. El escenario debe ser consensuado y lógico, así como oficial o validado; en la medida de las posibilidades deben de ser escenarios locales, antes que regionales. A partir de los datos del escenario se plantea la tendencia del clima que pondría en riesgo al sistema, por ejemplo, la tendencia es hacia lo seco o hacia lo lluvioso, hacia condiciones más cálidas o frías, más ventosas o menos ventosas. Tratar de definirlo por el comportamiento mensual y el momento del año en que tendería a ser más intenso. No hay adaptación sin un escenario de clima, de variabilidad, de eventos extremos o de cambio climático.
- b) Identificar y definir la amenaza. Una vez que el escenario futuro indica la tendencia, se requiere de información de carácter climático para comprenderlo. Las condiciones secas o lluviosas, cálidas o frías, ventosas o no, responden normalmente a un fenómeno de variabilidad climática conocido. Es necesario identificar estos fenómenos para entender su comportamiento en el año, su probabilidad de pronóstico y sus intensidades máximas históricas, identificarlos plantea dos escalas de tiempo. La primera es la adaptación en el corto plazo ante eventos de variabilidad del clima y sus extremos; por otra parte, adaptarnos a una condición futura de cambio, es una planificación de largo plazo que debe de buscar sostenibilidad y transmisión de acciones. Las dos escalas de tiempo nos

enfrentan a situaciones que deben ser claras: sequías, lluvias extremas, olas de calor, olas de frío, vientos acentuados, huracanes y tormentas. Para definir esta amenaza deben de recopilarse datos sobre impactos, rutas de paso, corredores y frecuencia de eventos, entre otros.

c) Luego de conocer y empezar a sumar conocimientos sobre la amenaza, se debe de trabajar en la vulnerabilidad del sistema a adaptar. La adaptación y su evaluación debe de basarse en la vulnerabilidad y el riesgo de los sistemas, no puede haber adaptación si no se tiene una idea clara de la vulnerabilidad del sistema. No tiene sentido tratar de adaptar un sistema que no sea vulnerable. Por lo tanto, es necesario saber cómo y dónde la presión puede hacer colapsar el sistema. Para esto se requiere sectorizar el sistema, el sector interesado debe de demostrar su vulnerabilidad ante la amenaza.

d) Es importante sectorizar la estrategia de adaptación y definir muy bien el enfoque, el recurso a gestionar y el concepto que define la adaptación. Este marco teórico-filosófico debe de ser planteado desde su inicio como un proceso de enseñanza-aprendizaje, por lo que se requiere de algo que enseñar, un método para transmitir, un auditorio que debe aprender y un modelo de sostenibilidad de la enseñanza. La planificación de este proceso debe contemplar las dimensiones para ser “adaptación competente”, por tanto, se inicia con enseñanza del concepto y el método, estrategia y comunicación para desarrollar la actitud. Si la adaptación pasa por el proceso de planificación de la enseñanza y el aprendizaje, se deben de lograr resultados más rápidos y concretos que la adaptación autónoma de las especies. Según Barbadilla (2006), la evolución científica y cultural no se limita a las leyes de la selección natural y la herencia genética, sino que sigue un proceso de transmisión horizontal

(entre individuos de una generación) y vertical (entre generaciones), que es mucho más veloz que los procesos de evolución biológica típicos.

e) Es necesario construir un banco de conocimiento sistematizado, que no solo almacene y actualice información, sino que permita establecer una métrica adecuada. Los procesos de adaptación deben de ser medibles, verificables, replicables, sostenibles en el tiempo y evaluables periódicamente.

4. Conclusiones

La adaptación de los sistemas humanos ante el clima, su variabilidad y cambio es una temática relativamente nueva, que aparece con vigor en el presente siglo. Como obedece a una estrategia que debe ser operativizada en el corto y mediano plazo, existe mucha incertidumbre sobre el abordaje metodológico que se debe de seguir.

Actualmente se están trasladando las experiencias exitosas de acciones principalmente ambientalistas de las últimas décadas, a la esfera del cambio de clima, justificando de esta manera su propósito adaptativo. Sin embargo, es necesario revisar profundamente el pensamiento y la filosofía que marca la adaptación al cambio climático con el fin de evitar en la medida de lo posible, procesos erróneos o poco claros. Se entiende que nuestra sociedad debe de iniciar con los primeros pasos de una adaptación sistematizada y que no se tiene una experiencia pasada en la cual se puedan basar sus acciones. La prueba y el error pueden marcar este inicio.

A pesar de esto, se deben de utilizar las herramientas disponibles para desarrollar procesos de adaptación coherentes. La formulación de la adaptación como un proceso de enseñanza-aprendizaje puede ser un enfoque interesante para lograr entender el propósito de la transmisión generacional y la sostenibilidad

sobre todo del pensamiento adaptativo, en busca de crear una nueva cultura productiva y una convivencia leal del ser humano con relación al ambiente.

5. Literatura citada

- Acosta, V. (1997). *Historia de los desastres en América Latina*. Volumen 2. Red de Estudios Sociales y Prevención de Desastres en América Latina (LA RED), Centro de Investigación y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), Intermediate Technology Development Group (ITDG). Lima, Perú. 315p.
- Aguayo-Lobo, A. (s.f.). *Los pingüinos*. Instituto Antártico Chileno. Gobierno de Chile. Diapositivas 30. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/192044804/Pinguinos-Anelio-Aguayo>
- Barbadilla, A. (2006). *La evolución biológica*. Departamento de Genética y Microbiología. Universidad Autónoma de Barcelona. España. 21p.
- Coopertatives for American Remittances to Europe. (2015). *¿Qué es la adaptación al Cambio Climático?* Documentos sobre Cambio Climático de CARE Internacional. 4p.
- De la Cruz, J., Yames, M., Sánchez, C.P., Simón, M. (2010). *Ambientes semiáridos del suroeste andaluz: el altiplano estepario*. (En línea). Andalucía. Consejería del Medio Ambiente. Junta de Andalucía. UE. Recuperado de: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas/ambientales/biodiversidad/habitats_y_ecosistemas/habitats_y_paisaje/publicaciones_y_eventos/altiplano_estepario/11_ALTIPLANO_cap%208B.pdf.
- Departamento Nacional de Planeación. (2012). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. ABC: Adaptación bases conceptuales. Marco conceptual y lineamientos. Ministerio del Ambiente- IDEAM-SNGR. Colombia. 80p.
- García, V. (2011). *Aprender y enseñar matemática*. Las dimensiones de la competencia matemática. Clase 3000. Recuperado de: <http://clase3000.blogspot.com/2011/01/aprender-y-ensenar-matematicas-las.html>
- INECO. (2007). Plan Territorial Especial de Infraestructura del tren del sur. *Climatología, hidrología y drenaje*. Anexo N°7. Cabildo de Tenerife, España. 67p.
- Intergovernmental Pannel on Climate Change. (2001). *Cambio climático 2001: Informe de síntesis*. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Ginebra. OMM-PNUMA. 207p.
- Intergovernmental Pannel on Climate Change. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad* – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 p.
- Lal, Rattan. (2011). *Climate of south Asia and the human wellbeing*. In: Lal, R.; Sivakumar, M.; Faiz, S.; Rahman, A.; Islam, K. 2011. Climate change and food security in South Asia. Springer Science and Business Media. London. 600p.
- León, G. (2012). *¿Cómo saben las plantas cuándo florecer?* Recuperado de: <https://elefectorayleigh.cl/2012/08/21/como-saben-las-plantas-cuando-florecer/>
- Lhumeau, A. y Cordero, D. (2012). *Adaptación basada en ecosistemas: una respuesta al cambio climático*. UICN, Quito, Ecuador. 17p.

- Linares, S. (2003). *Matemáticas escolares y competencia matemática*. Capítulo 1. In: Chamorro, M.C. Didáctica de las Matemáticas. Pearson Prentice Hall.
- Manzanilla, L. (1997). *Indicadores arqueológicos de desastres: Mesoamérica, Los Andes y otros casos*. Cap. II. Sequías e Inundaciones. In: Acosta, V. 1997. Historia de los desastres en América Latina. Vol.2. La RED, CIESAS, ITDG. Lima, Perú. 315p.
- Pascual, J. A. (2013). La Tierra como sistema. *Enseñanzas de las ciencias de la Tierra*. 21(2):130-138.
- Retana, J. (2000). Relación entre algunos aspectos climatológicos y el desarrollo de la langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walker 1870) en el Pacífico Norte de Costa Rica durante la fase cálida del fenómeno ENOS. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 7(2):64-73.
- Retana, J.; Calvo, M.; Sanabria, N.; Córdoba, J.; Calderón, K. y Cordero, K. (2017). *Análisis de riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en Costa Rica*. Casos de estudio: Liberia, Carrillo, Matina y Talamanca. Proyecto Apoyo al Programa Nacional de Cambio Climático en Costa Rica. Mejora de la capacidad de mitigación y adaptación. Instituto Meteorológico Nacional. MINAE-AECID-MIDEPLAN. San José, Costa Rica. 127p.
- Stratus Consulting, Inc. (2004). *Adaptación al cambio climático: Hermosillo, Sonora; un caso de estudio*. México. Universidad Autónoma de México, Colegio de Sonora, Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. United States Environmental Protection Agency. 66p.
- Street, R. (2007). Adaptación al cambio climático: un reto y una oportunidad para el desarrollo. In: OMM, 2009. *Afrontando los retos del desarrollo*. OMM 56(3):174-178.
- Organización de las Naciones Unidas. (2005). *La adaptación tiene que ver sobre todo, con el agua*. Grupo de Trabajo sobre Agua y Cambio Climático. ONU. Ginebra, Suiza. 2p.
- Wilches-Chaux, G. (2011). *Culturas anfibias del caribe. Aguaceros y Goteras*. Recuperado de: <http://enosaquiwilches.blogspot.com/2011/04/culturas-anfibias.html>.

Propuesta metodológica para la predicción climática estacional del veranillo en la cuenca del río Tempisque en el Pacífico Norte de Costa Rica

ERIC J. ALFARO MARTÍNEZ^{1,2,3} Y HUGO G. HIDALGO LEÓN^{1,2}

Resumen

El ciclo anual de la precipitación en la vertiente del Pacífico de América Central, se caracteriza por tener dos máximos, uno entre mayo-junio y el otro entre setiembre-octubre, además de una estación seca de noviembre a abril y un periodo corto en el que las lluvias disminuyen durante julio-agosto, conocido como veranillo o canícula. En este trabajo se estudia la predictibilidad del veranillo, utilizando cuatro registros de precipitación diarios de las estaciones meteorológicas de Nicoya, Santa Cruz, Bagaces y Liberia, para el periodo 1937-2010 y localizadas en la cuenca del río Tempisque, provincia de Guanacaste, vertiente del Pacífico Norte de Costa Rica en América Central. Dentro de los aspectos considerados están la predictibilidad de la magnitud e intensidad del veranillo. Se explora la modulación de estos aspectos por fuentes de variabilidad climática asociadas con el Pacífico ecuatorial del Este (ENOS) y al océano Atlántico (AMO), incluyendo su variabilidad interanual y decenal. Cuando las anomalías normalizadas de ambos índices se comparan, se encontró que los eventos cálidos (fríos) del ENOS tienden a estar asociados con condiciones más (menos) secas durante el veranillo y estas condiciones se refuerzan cuando están asociados a su vez con condiciones de anomalías negativas (positivas) del AMO.

PALABRAS CLAVE: VERANILLO, CANÍCULA, VARIABILIDAD CLIMÁTICA, TEMPISQUE, PREDICCIÓN CLIMÁTICA ESTACIONAL, ANÁLISIS CATEGÓRICO, AMÉRICA CENTRAL

Abstract

On the Pacific slope of Central America, the precipitation annual cycle is characterized by two rainfall maxima in May-June and September-October, an extended dry season from November to April, and a shorter reduced precipitation period during July-August known as Mid-Summer Drought (MSD) or “veranillo” and “canícula” in Spanish. Four daily gauge stations records, e.g. Nicoya, Santa Cruz, Liberia and Bagaces, located in the Tempisque river basin, province of Guanacaste, North Pacific slope of Costa Rica in Central America, were studied to explore the predictability of the MSD from 1937 to 2010. Among the aspects considered are the predictability of the MSD intensity and depth of the minimum. The modulation of these aspects by climate variability sources such as the Equatorial Eastern Pacific (ENSO) and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) was lately explored, including their interannual and decadal variability. When the normalized comparison is performed between the indices, it was found that warm (cool) ENSO events tend to be associated with dry (wet) MSD conditions and this condition is reinforced during periods with negative (positive) AMO anomalies.

KEYWORDS: MID SUMMER DROUGHT, CLIMATE VARIABILITY, TEMPISQUE, SEASONAL CLIMATE PREDICTION, CATEGORICAL ANALYSIS, CENTRAL AMERICA

1 Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Universidad de Costa Rica.

2 Escuela de Física, Universidad de Costa Rica.

3 Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica.

Correos electrónicos: erick.alfaro@ucr.ac.cr, hugo.hidalgo@ucr.ac.cr

1. Introducción

Según Maldonado, Rutgersson, Alfaro, Amador y Claremar (2016), en la vertiente del Pacífico de América Central la precipitación muestra un ciclo anual bimodal. El primer valor máximo de la lluvia ocurre cuando las aguas oceánicas circunvecinas alcanzan temperaturas superficiales cercanas a los 29° C en la piscina cálida del Pacífico Tropical del Este (PTE) y la magnitud de los vientos alisios disminuye, provocando un incremento de la convección sobre la región y favoreciendo la migración hacia el norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Durante los meses de julio y agosto se observa un mínimo relativo en la precipitación, acompañado de un decrecimiento de la temperatura superficial del mar en la piscina cálida del PTE y un incremento de la magnitud de los vientos alisios. Esta reducción de las lluvias es conocida regionalmente como veranillo o canícula.

El segundo máximo de la precipitación en la vertiente del Pacífico de América Central, ocurre durante el trimestre de agosto-setiembre-octubre y es acompañado por una reducción de la magnitud de los vientos alisios y un incremento relativo de la temperatura superficial del océano, que puede alcanzar o superar los 28,5° C en la piscina cálida del PTE.

El veranillo ha sido ampliamente caracterizado en el PTE por estudios como los de Magaña, Amador y Medina (1999), Amador, Alfaro, Lizano y Magaña (2006) y Amador, Durán-Quesada, Rivera, Mora, Sáenz, Calderón y Mora (2016); y para estaciones pluviométricas en América Central por Alfaro (2002) y Maldonado *et al.* (2016). Sin embargo, tal y como lo señala Maldonado *et al.* (2016), el tema sobre los mecanismos físicos que gobiernan la ocurrencia del veranillo en la región sigue siendo un tema de investigación abierto y de debate (e.g. Magaña *et al.*, 1999; Karnauskas, Seager, Giannini, & Busalacchi, 2013; Herrera, Magaña & Caetano, 2015).

Específicamente en Costa Rica, Ramírez (1983) encontró que la parte central del Pacífico Norte es una de las regiones en donde está muy bien definido y es más intenso el veranillo, ahí se ubica la cuenca del río Tempisque, una de las más importantes del país. Ramírez (1983) observó, que en esta región el descenso de la lluvia se acentúa a partir del 1 de julio y que la precipitación suele aumentar de nuevo en la segunda quincena de agosto. Esto coincide con lo propuesto por Alfaro (2002), quién notó que la fecha más probable de ocurrencia del veranillo en dicha región se ubicaba entre el 5 y el 19 de julio.

En una caracterización reciente del veranillo en la cuenca del río Tempisque hecha por Alfaro (2014), se observó que el inicio de los eventos tiende a presentarse entre el 11 de junio y el 21 de julio, su mínimo en cuanto a la cantidad de lluvia registrada, entre el 9 de julio y el 4 de agosto, y el final entre el 28 de julio y el 30 de agosto. El 50% de las observaciones de la duración de los eventos se ubicaron en los 34,5 y 54 días, las intensidades de los eventos se observaron entre 4,3 y 8,5 mm día⁻¹ y entre 2,0 y 3,9 mm para las magnitudes, definida la intensidad como la precipitación promedio observada durante los eventos y la magnitud como a la cantidad de lluvia registrada durante el mínimo de todos los eventos estudiados. Dentro de los años más secos durante estos eventos se encuentran 1965, 1970, 1972, 1976, 1982, 1986, 2000 y 2001. Para la cuenca del Tempisque el evento de mayor duración se observó para el año 1999, sin embargo no fue el año que tuvo el veranillo más seco.

Lo anterior coincide en términos generales con Hernández y Fernández (2015), quienes caracterizaron el veranillo o canícula en la zona del Pacífico Norte utilizando valores umbrales pentadales de la evaporación, específicos para cada región climática del país, por medio del método FAO-56 Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia e identificando los puntos de inflexión en donde

la péntada de evaporación y precipitación coinciden, con lo cual se obtienen las ocurrencias del veranillo. El Pacífico Norte se caracterizó por un veranillo que va del 26-30 de junio al 15-19 de septiembre, con umbrales de 31-42 mm y 33-35 mm respectivamente.

Por su parte, Solano (2015) estudió y caracterizó el comportamiento de los veranillos en las cuencas de los ríos Nosara, Tempisque, Abangares y Jesús María, en el Pacífico Norte de Costa Rica, en el periodo 1981-2010, mediante el uso del método de Alfaro (2014). De las cuencas estudiadas en esa región Solano (2015) señala, que la cuenca del río Tempisque presentó los valores más bajos para la magnitud e intensidad de los eventos, con medianas observadas de 1,8 mm y 5,6 mm día⁻¹, respectivamente. También es la cuenca con una mayor duración de los eventos de alrededor de 46 días; los inicios más tempranos cerca del 21 de junio y los finales más tardíos alrededor del 16 de agosto, este último similar al valor de la cuenca del río Abangares. Por último, las fechas de los mínimos de los eventos del veranillo tienden a presentarse cerca del 17 de julio; resultados que verifican los obtenidos previamente por Alfaro (2014).

Alfaro (2014) exploró la modulación y la predicción de los aspectos relacionados al veranillo, debido a fuentes de variabilidad climática tales como el Pacífico ecuatorial del Este, en donde se observó que condiciones cálidas (frías) del índice Niño 3.4 durante el mes de junio, tienden a estar relacionadas con eventos más secos (más lluviosos) de veranillos. Dichos resultados fueron corroborados por Solano (2015) para las cuencas que estudió en el Pacífico Norte de Costa Rica. Sin embargo, Waylen y Quesada (2012) sugieren que el veranillo en América Central es menos (más) severo, cuando además el océano Atlántico está más cálido (frío) al compararlo con el Pacífico ecuatorial del Este.

Anteriormente Fallas-López y Alfaro (2012), utilizaron la técnica estadística del análisis de tablas de contingencia para elaborar esquemas predictivos de los campos de precipitación en América Central, incluyendo el veranillo, a partir de la primera componente principal de los registros de 146 estaciones con datos diarios. Dichos autores mostraron, que la intensidad de los veranillos está relacionada con los valores de los índices climáticos de abril y mayo de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (Enfield, Mestas-Núñez & Trimble, 2001) o AMO por sus siglas en inglés, de la Oscilación Decenal del Pacífico (Mantua, Hare, Zhang, Wallace, & Francis, 1997) o PDO por sus siglas en inglés, por índices de El Niño-Oscilación del Sur o ENOS (como el Niño 3 o el Niño 3.4), o por combinaciones de ellos. Específicamente, veranillos más intensos están asociados con valores en el tercil superior de los índices PDO+Niño 3 y Niño 3, y por valores en el tercil inferior de los índices AMO-Niño 3 y AMO-PDO. La respuesta en la intensidad de los veranillos disminuye para los terciles opuestos de los índices mencionados. Para los predictores de abril y mayo, los veranillos más (menos) intensos están asociados con valores en el tercil inferior (superior) del índice compuesto AMO-(PDO+Niño 3). Al considerar el inicio de los eventos de veranillo, se observó que su inicio temprano (tardío) se asocia con condiciones de El Niño (La Niña), AMO frío (cálido), AMO-Niño 3 y AMO-(PDO+Niño 3) con valores bajos (altos).

Los dos trabajos anteriores concuerdan en términos generales con los resultados recientes obtenidos por Maldonado *et al.* (2016), quienes mostraron que la intensidad y magnitud del veranillo puede ser predicho hasta con tres meses de anticipación utilizando la temperatura superficial del mar de los mares circundantes, como campo predictor en un esquema de modelos estadísticos de Análisis de Correlación Canónica. Los resultados mostraron que cuando se tienen condiciones más frías (cálidas) en junio en el Atlántico Tropical Norte, en conjunto con condiciones más cálidas

(frías) en el Pacífico ecuatorial del Este, se observa una tendencia hacia condiciones más (menos) secas durante los veranillos registrados en 25 estaciones meteorológicas de América Central.

Debido a la importancia del manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Tempisque, una de las principales de Costa Rica, se plantea como objetivo de este trabajo la predicción estacional del veranillo en esta región. De acuerdo a Maldonado *et al.* (2016), esta predicción es importante para la provincia de Guanacaste debido a que el veranillo, que es un evento de alta variabilidad tanto espacial como temporal, se desarrolla en la región todos los años y esta es una cuenca con actividades industriales y agrícolas importantes para el país, donde se ubica además la mayoría de la población de la provincia (Alfaro, 2014), por lo que podría afectar sectores socioeconómicos claves como la agricultura y abastecimiento de agua potable. Por ejemplo, muchos agricultores usan la entrada del veranillo como una indicación para determinar tiempos de siembra (García-Solera & Ramírez, 2012).

2. Metodología

Se usaron los registros de precipitación de cuatro estaciones pluviométricas, con registros acumulados diarios del trabajo de Alfaro (2014). Dichas estaciones son Bagaces (10.53° N, 85.25° W), Liberia (10.60° N, 85.54° W), Santa Cruz (10.26° N, 85.58° W) y Nicoya (10.15° N, 85.45° W). Las mismas tenían registros disponibles para los años 1974-2007, 1957-2010, 1937-2010 y 1949-2010, respectivamente. En ese mismo orden el porcentaje de datos faltantes fue de 1,0, 13,8, 22,2 y 6,7. Según Alfaro (2014), la utilización de los registros en forma conjunta permitió la caracterización del veranillo en esta cuenca entre los años 1949 y 2010, además del año 1937, es decir 63 eventos.

Siguiendo lo sugerido por Alfaro (2014), los datos faltantes de los registros diarios se rellenaron con un modelo autorregresivo de orden 1, de acuerdo a la metodología descrita por Alfaro y Soley (2009). Para minimizar las falsas interrupciones de los eventos de veranillo, debido a las perturbaciones que pueden afectar el análisis de variabilidad temporal de menos de un mes, como el debilitamiento de los vientos alisios, el acercamiento de la ZCIT (por presencia de bajas presiones en el Mar Caribe o en el PTE) y el derrame de lluvia desde la vertiente Caribe descritas en detalle por Ramírez (1983), se filtraron las series de tiempo con una media móvil triangular de 31 datos de acuerdo a Soley (1994). Luego, se calculó el promedio aritmético de todas las series ubicadas en una misma cuenca para producir un índice de precipitación.

Utilizando dicho índice, se examinaron los meses de mayo a setiembre para encontrar el mínimo de precipitación en ese periodo, el cual se tomó como la fecha del mínimo de precipitación del evento del veranillo durante ese año en particular. Para cada año, la fecha del inicio del evento se definió como el día en donde el índice empieza a disminuir y la fecha final de cada uno cuando esta serie deja de aumentar, considerando el cambio en la pendiente. La duración del mismo se estimó como la fecha del final menos la del inicio en días julianos. La intensidad de cada evento se asoció a la precipitación promedio diaria durante los eventos y la magnitud de cada uno de ellos se definió como el valor de precipitación localizado en el mínimo del valle de cada evento en particular. Como un ejemplo, se observó que el veranillo del año 1969 inició el 9 de junio y finalizó el 10 de agosto, para una duración de 63 días. El mínimo se ubicó el 14 de julio con una precipitación asociada de 1,1 mm (magnitud). La precipitación promedio (intensidad) estimada entre las fechas del inicio y final fue de 4,9 mm día⁻¹.

Del procedimiento anterior, se obtuvieron cinco series anuales para cada cuenca y se estudió su

relación con la variabilidad climática asociada con AMO y ENOS. Para ello se emplearon las diferencias normalizadas de las anomalías de los índices AMO y Niño 3.4, observadas durante el mes de junio para explorar relaciones de tipo predictivo, ya que la mayoría de las fechas del mínimo de los eventos del veranillo se registran en el mes de julio. Se usaron dos herramientas de análisis categórico para explorar estas relaciones (Agresti, 2002), la primera fue el análisis de Tablas de Contingencia propuesto por Alfaro, Soley y Enfield (2003), en donde tanto la serie anual asociada al veranillo como la del índice AMO-Niño 3.4 se categorizaron en tres clases a saber, Bajo lo Normal (BN), Normal (N) y Arriba de lo Normal (AN), para construir tablas de 3 x 3 de 9 categorías conjuntas. Los límites de clases se establecieron de acuerdo a los percentiles 33,33 y 66,67 en ambas series. Todas las series de las cinco características fueron introducidas en la Tabla de Contingencia, sin embargo sólo las series de la intensidad y la magnitud mostraron relaciones estadísticamente significativas, por lo que serán las únicas consideradas en el análisis posterior.

La segunda herramienta estadística correspondió a los modelos *logit*, construidos de acuerdo a lo explicado por Wilks (2011), de acuerdo a la ecuación:

$$y(x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x)}}, \text{ (Ecuación 1)}$$

Para el ajuste de la ecuación anterior, el valor de x corresponde al valor de la anomalía del índice AMO-Niño 3.4 observada durante el mes de junio, y y es alguna de las cinco series binarias anuales sobre algún aspecto del veranillo, con valores de 1 asociados a la categoría AN o BN, según sea el caso, y 0 de otra forma. Nótese que este ajuste da como resultado dos series de probabilidad anuales (y_{AN} y y_{BN}) y se puede calcular una tercera asociada a la categoría N estimada como $y_N = 1 - y_{AN} - y_{BN}$. Las mismas se pueden multiplicar por 100 para expresarlas como porcentajes, es decir:

$$y_{AN} + y_N + y_{BN} = 100, \text{ (Ecuación 2)}$$

Lo anterior para todos los valores de las anomalías observadas del índice AMO-Niño 3.4 y durante todos los años que comprendió el estudio. El índice Niño 3.4 se obtuvo del repositorio del Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI, por sus siglas en inglés) (Consultado: 24 de junio de 2013, <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Indices/.nino/.EXTENDED/.NINO34/T+exch+table+text+text+skipanyNaN+table+.html>). El índice AMO se obtuvo del repositorio del Laboratorio de Investigación para el Sistema Tierra (ESRL, por sus siglas en inglés) (Consultado: 26 de agosto de 2014, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>).

Cabe destacar, que la metodología desarrollada en los párrafos anteriores, fue expuesta en el Foro de Predicción Climática de América Central (García-Solera & Ramírez, 2012) de Tegucigalpa en julio de 2013 y ha servido de insumo para foros posteriores como los celebrados en abril de 2014 en Ciudad de Guatemala, noviembre de 2014 en Ciudad de Panamá y julio de 2015 en Tegucigalpa, en donde se realizaron actividades de seguimiento y transferencia de la metodología hacia los participantes del Foro, así como la realización de ejercicios con estaciones de otros países de América Central.

El análisis de ondeletas fue realizado de acuerdo a la metodología de Torrence y Compo (1998), a través del sitio <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/> (última visita, 31/05/2017). La función usada para el cálculo de la misma fue la de Morlet y se contrastó el espectro contra uno teórico de ruido rojo, el cual compara el espectro observado con uno de un modelo autorregresivo de orden 1 (Wilks, 2011). El gráfico de ondeletas usado, permite ver la importancia relativa de las contribuciones asociadas con las diferentes oscilaciones presentes en la serie, en función del tiempo. Lo anterior muestra los meses en los

cuales oscilaciones de un periodo determinado, tienen mayor o menor potencia espectral asociada.

Se obtuvieron también los datos de la producción anual de arroz, de los informes anuales del Consejo Nacional de la Producción y de la Corporación Arrocera Nacional, para contrastar esta producción con la severidad del veranillo observado en Guanacaste, entre 1970 y el año 2010.

3. Resultados y discusión

Ninguna de las series asociadas con la caracterización del veranillo mostró una tendencia lineal estadísticamente significativa. La figura 1 muestra el análisis espectral de las series anuales de los índices AMO-Niño 3.4 (en junio), así como la de la intensidad y magnitud del veranillo. El análisis por ondeletas mostró periodicidades interanuales cerca de los tres años, las cuales podrían ser atribuidas al ENOS y cerca de los 8 a 10 años, lo que podría mostrar la influencia del océano Atlántico sobre la región u otra fuente de variabilidad decadal no considerada en este trabajo, sin embargo estas periodicidades se observaron por debajo del espectro teórico de ruido rojo.

El cuadro 1 muestra las relaciones observadas entre las anomalías observadas en junio del índice AMO-Niño 3.4 (filas) y la intensidad y la magnitud de los eventos (columnas) del veranillo en la cuenca de río Tempisque. No se encontraron relaciones estadísticamente significativas entre este índice climático y algún otro aspecto asociado con el veranillo (e.g. inicio, final y duración de los eventos) en la cuenca. El análisis de esta Tabla de Contingencia (Cuadro 1) arroja que en ambas cuencas, el escenario seco (BN) es el más probable para condiciones con anomalía negativas (BN) del índice AMO-Niño 3.4, es decir, cuando el Atlántico se encuentra relativamente más frío que

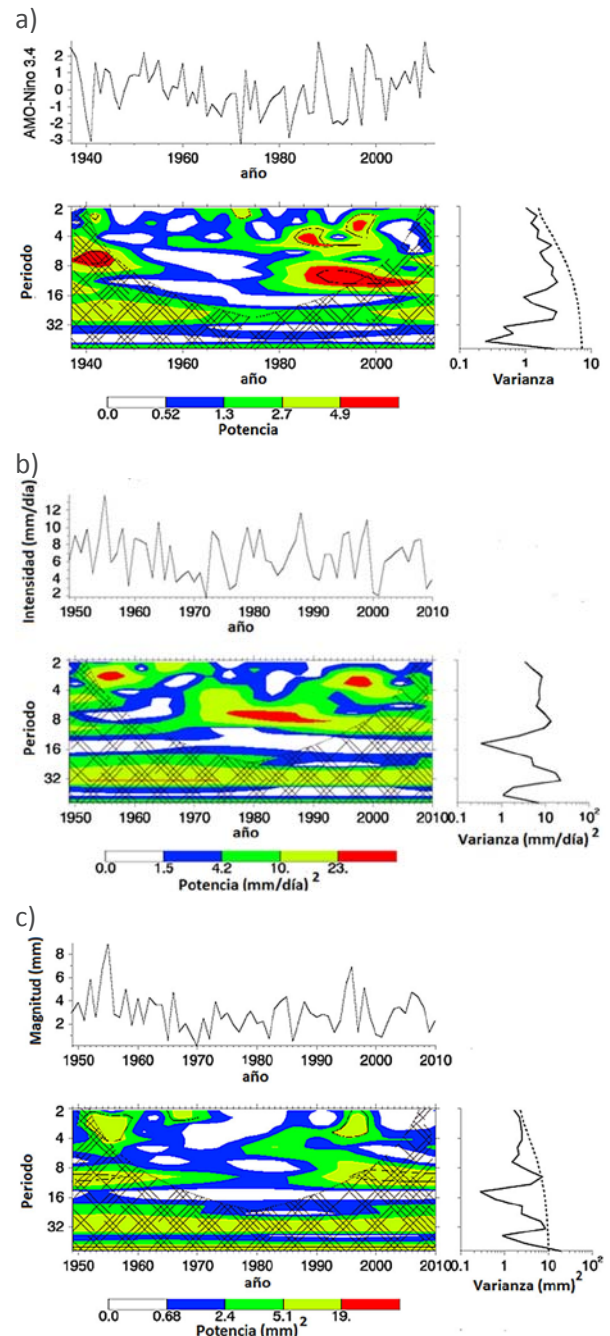


Figura 1. Series anuales de tiempo, el inferior izquierdo presenta el análisis de ondeletas y el inferior derecho el espectro, para a) el índice AMO-Niño 3.4 en junio, b) la intensidad y c) la magnitud del veranillo. Gráficos realizados de acuerdo a la metodología de Torrence y Compo (1998).

el Pacífico ecuatorial del Este, mientras que los eventos menos severos del veranillo, agrupados en la categoría (AN), son más probables cuando

Cuadro 1. Probabilidades empíricas condicionales para la intensidad y la magnitud del veranillo en la cuenca del Tempisque, dada una anomalía observada en junio del índice AMO-Niño 3.4.

		BN	Intensidad N	AN
		($\leq 5.1 \text{ mm día}^{-1}$)		($\geq 8.0 \text{ mm día}^{-1}$)
	BN (≤ -0.59)	48(10)**	38(8)	14(3)***
AMO-Niño 3.4	N	38(8)	38(8)	29(6)
Junio	AN (≥ 0.63)	14(3)***	29(6)	57(12)***

		BN	Magnitud N	AN
		($\leq 2.2 \text{ mm}$)		($\geq 3.4 \text{ mm}$)
	BN (≤ -0.59)	61(13)***	29(6)	10(2)***
AMO-Niño 3.4	N	29(6)	38(8)	33(7)
Junio	AN (≥ 0.63)	10(2)***	33(7)	57(12)***

Nota. Los valores entre paréntesis son las frecuencias empíricas absolutas y las categorías usadas son bajo lo normal (BN), neutral (N) y arriba de lo normal (AN). La correlación de Spearman para las series de la tabla superior e inferior fue de 0.46*** y 0.57***, respectivamente. Los asteriscos denotan la significancia estadística, donde $\alpha = 0.01 \rightarrow$ ***, $0.05 \rightarrow$ **, $0.10 \rightarrow$ *.

se asocian con anomalías positivas (AN) del índice AMO-Niño 3.4, es decir, cuando el Atlántico se encuentra relativamente más cálido que el Pacífico ecuatorial del Este.

Al observar la mayoría de las fechas del mínimo de los eventos del veranillo en el mes de julio, los resultados del cuadro 1 sugieren un esquema de tipo predictivo sobre la intensidad y la magnitud de los mismos, al igual que en Alfaro (2014). Estas relaciones predictivas se muestran en la figura 2, por medio del uso de modelos *logit*. El cuadro 2 lista los coeficientes ajustados para los escenarios BN y AN. Se observa que el único coeficiente no significativo al 99% ($|z| > 2.576$) fue el de la intensidad en la cuenca del Tempisque para el escenario BN, sin embargo es significativo al 95%.

Todos los modelos ajustados muestran que el escenario más probable para anomalías positivas (negativas) en el índice AMO-Niño 3.4 es el AN (BN) en la intensidad y magnitud del veranillo en la cuenca. Para fines de trabajo operativo, junio puede presentar algunos inconvenientes en su uso como predictor ya que por lo general los índices AMO y Niño 3.4 pueden estar disponibles una o hasta dos

semanas después de finalizado el mes junio, eso quiere decir que los índices de junio podrían estar listos precisamente cuando se está registrando el evento del veranillo. Adicionalmente, en los casos en que efectivamente el mínimo (magnitud) se registra en julio, la intensidad puede comenzar en junio o con mayor frecuencia a principios de julio. Lo anterior no invalida el hecho de que la relación encontrada en este estudio sea predictiva, pero dados los problemas señalados en su uso operacional, se podría explorar el uso de un esquema de pronosis perfecta (Wilks 2011), en donde se pueden usar pronósticos para el mes de junio de la TSM para calcular los índices, y de esta manera establecer una relación con los aspectos del veranillo estudiados. Nótese que aún así, la relación también tiene un uso potencial en diagnóstico.

Al comparar los resultados de los modelos obtenidos en este trabajo con los de Alfaro (2014) en la cuenca del río Tempisque, se observó que la significancia estadística de las Tablas de Contingencia y los modelos *logit* aumentó, al incluir en el análisis la variabilidad el océano Atlántico por medio del uso del índice AMO,

Cuadro 2. Coeficientes de los modelos *logit* ajustados

Modelos, Tempisque	β_0	β_1	z_0	z_1
Intensidad, y_{AN}	-0.86	0.78	-2.75	3.15
Intensidad, y_{BN}	-0.80	-0.58	-2.71	-2.56
Magnitud, y_{AN}	-0.88	0.83	-2.77	3.25
Magnitud, y_{BN}	-1.04	-1.13	-2.90	-3.62

Nota: coeficientes ajustados de acuerdo con la ecuación 1 para obtener las curvas de probabilidad de los escenarios arriba de lo normal (AN) y bajo lo normal (BN) en la cuenca del río Tempisque (ver fig. 2). Los valores de z representan el coeficiente obtenido dividido entre su error estándar. Los coeficientes significativos al 99% están mostrados con letra tipo *itálica*.

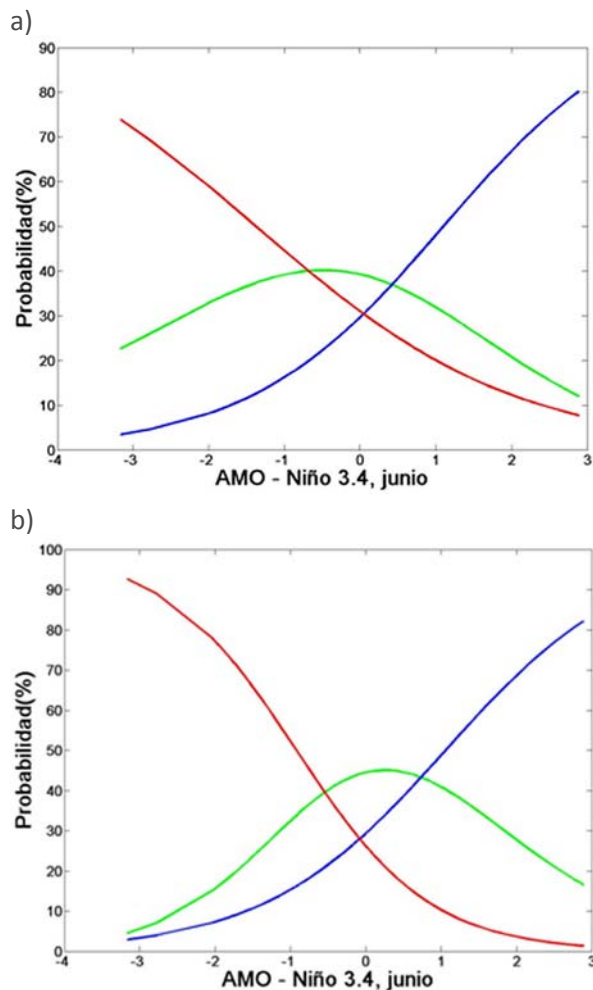


Figura 2. Modelos *logit* ajustados de acuerdo a la ecuación 1, para la a) Intensidad y b) Magnitud del *veranillo* en la cuenca del Tempisque, con x dado por la anomalía observada en el índice AMO-Niño 3.4 durante el mes de junio. La línea azul, verde y roja son para la probabilidad de los escenarios AN, N y BN, respectivamente de los modelos y_{AN} , y_N y y_{BN} , presentados en el cuadro 2.

ya que Alfaro (2014) consideró únicamente la variabilidad en el Pacífico ecuatorial del Este, por medio del uso del índice Niño 3.4.

Los resultados obtenidos con Tablas de Contingencia y con modelos *logit*, concuerdan en términos generales con los resultados obtenidos a nivel regional por Fallas-López y Alfaro (2012) y Maldonado et al. (2016). Lo anterior coincide y confirma el modelo conceptual de diagnóstico propuesto por Waylen y Quesada (2012), quienes explican que temperaturas más bajas (cálidas) de lo normal en el Atlántico Tropical Norte significan un reforzamiento (un debilitamiento) en el anticiclón subtropical del Atlántico Norte y de los vientos alisios. Cuando se combinan con temperaturas más (menos) cálidas (menor (mayor) presión atmosférica) en el Pacífico ecuatorial oriental, el gradiente de presión a través del istmo aumenta (disminuye), incrementándose (debilitándose) el efecto orográfico de la Cordillera de Guanacaste y de Tilarán. Cuando el Atlántico está más (menos) cálido, la consiguiente reducción (reforzamiento) de la fuerza de los vientos alisios reduce (aumenta) la precipitación en la mayor parte de la región.

La figura 3 muestra el gráfico de dispersión de la producción nacional de arroz, contra la lluvia observada en el mínimo del veranillo del año anterior, que es usada en este estudio como una medida de la magnitud del evento. Se observa que la producción de arroz tiende a estar igual o por encima de su mediana, cuando el veranillo no es tan severo, es decir, 14 casos. Por otro lado,

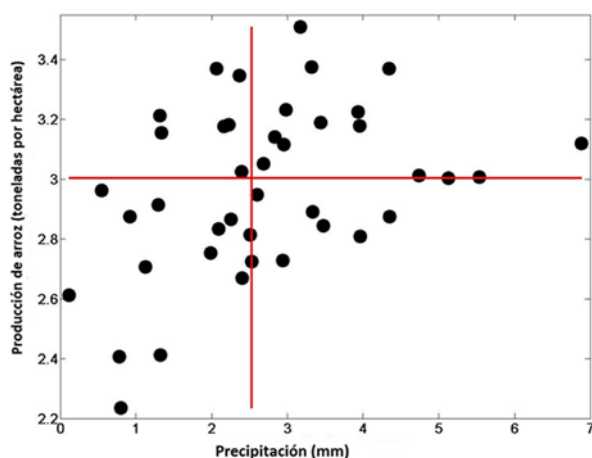


Figura 3. Gráfico de dispersión de la producción nacional anual de arroz contra la lluvia observada en el mínimo del veranillo del año anterior, que es usada en este estudio como una medida de la magnitud del evento, para el periodo 1970-2010 ($r_s = 0.37$, valor- $p = 0.017$). La línea roja horizontal y vertical corresponde a la mediana de los datos de la producción de arroz y de la magnitud del veranillo, respectivamente.

los veranillos severos que se observaron igual o por debajo de su mediana, se asociaron también con 14 casos en los cuales la producción nacional de arroz se observó por debajo su mediana. Sin embargo, al analizar los resultados de la figura 3 se debe tomar en cuenta algunos aspectos: que la producción nacional de arroz es una medida acumulativa de todo un año, mientras que el efecto del veranillo es por uno o dos meses, en función del ciclo fenológico del arroz. Además, las fechas de siembra se dan aproximadamente en agosto, cuando podría haber pasado lo más severo del veranillo. También hay que tomar en cuenta, que en el dato de producción anual se está considerando en la producción nacional el aporte del arroz con riego (aproximadamente un 34% del área sembrada es con este método, la cual varía año con año), el cual no necesariamente es afectado por el veranillo. Por último, en el cálculo de producción se incluyen zonas arroceras fuera de Guanacaste, como en el Pacífico Central-Sur, Caribe Norte y Zona Norte; donde el veranillo es más débil o inexistente. De hecho, alrededor de un 35% del arroz se siembra Guanacaste,

dato que varía también año con año. Debido a lo anterior, los resultados en la figura 3 podrían más bien indicar que existe un efecto modulador de las lluvias sobre Costa Rica, que impacta una región más amplia que Guanacaste y que esta relación AMO-Niño 3.4 podría estar modulando además las condiciones de precipitación previas al veranillo (e.g. Alfaro et al. 2016) y/o posteriores al mismo (Maldonado et al. 2013).

El control climático sobre la producción de arroz en la cuenca había sido sugerido por Villalobos (2001), mostrando que existe más probabilidad de obtener rendimientos por encima del promedio en períodos La Niña y/o inferiores a lo normal en fase El Niño, y que esto está asociado con la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones durante el ciclo del cultivo, superiores y/o inferiores a lo normal respectivamente y se determinó que bajo condiciones de fase cálida los rendimientos de arroz de secano, es decir, aquel no asistido por riego, disminuyen, debido principalmente a una disminución de las lluvias y un aumento en la temperatura en la región. Esta reducción fue reportada también por Retana (1999), quién encontró reducciones de hasta 10.000 y 30.000 toneladas para algunos de los eventos Niño estudiados, lo que repercute en pérdidas económicas importantes (Retana, Villalobos, Alvarado, Sanabria, y Córdoba, 2014). Retana y Solano (2000) agregan que, al haber una buena correlación entre años Niña y rendimientos de arroz mayores al promedio, y a pesar de existir una alta incidencia de inundaciones durante estos fenómenos océano-atmosféricos, se puede deducir que las inundaciones no han afectado mayormente el rendimiento de arroz observado en la región, ya que probablemente la capacidad hidrofílica del cultivo del arroz, le permite mantener su rendimiento en la región, aún con escenarios lluviosos importantes.

Por otra parte, Retana et al. (2014) señalan que el cultivo del arroz de secano en Guanacaste es especialmente susceptible ante disminuciones de

la precipitación durante los períodos del veranillo y durante setiembre-octubre, ya que las amenazas del clima en estas zonas básicamente se refieren a extremos secos que normalmente se asocian a la presencia de eventos El Niño, durante la época lluviosa, como sucedió durante el año 2015 (ver por ejemplo las notas periodísticas, *Sequía en Guanacaste deja millonarias pérdidas en caña, arroz y reses*, del 9 de junio de 2015, <http://www.teletica.com/Noticias/93067-Sequia-en-Guanacaste-deja-millonarias-perdidas-en-cana-arroz-y-reses-.note.aspx> y *Sequía en Guanacaste deja pérdidas totales en 714 hectáreas de arroz*, del 18 de setiembre de 2015 <http://www.elmundo.cr/sequia-en-guanacaste-deja-perdidas-totales-en-714-hectareas-de-arroz/>, última visita, 31/05/2017).

Según Alfaro (2014), la vertiente del Pacífico es la que reporta mayor cantidad de impactos asociados a déficit de lluvia junto con temperaturas por encima del promedio durante los eventos El Niño. Estas condiciones secas durante los eventos El Niño tienden a reforzarse cuando además se observan condiciones más frías de lo normal en el Atlántico Tropical Norte, durante el primer pico de la estación lluviosa (mayo-junio, Alfaro, Hidalgo & Mora, 2016), el veranillo (julio-agosto, Maldonado *et al.* 2016) y el segundo pico de la estación lluviosa (setiembre-octubre, Maldonado, Alfaro, Fallas & Alvarado, 2013).

4. Conclusiones

La metodología empleada permitió la caracterización del veranillo en una de las principales cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, a saber, río Tempisque, con problemas en la gestión del recurso hídrico. Los eventos del veranillo tienden a iniciar a principios de julio, con mínimos ubicados alrededor del 21 de julio y finalizando generalmente en los primeros quince días de agosto. En la cuenca del Tempisque estos eventos duraron alrededor de 45 días, con

precipitaciones promedio asociadas de 6,6 mm día⁻¹ y 2,7 mm de lluvia en sus mínimos.

Ninguna de las series asociadas con la caracterización del veranillo en este trabajo, mostró una tendencia estadísticamente significativa. El análisis de Tablas de Contingencia mostró que el escenario seco (BN) es el más probable para condiciones cálidas (BN) del índice AMO-Niño 3.4 (en junio), mientras que los eventos menos severos del veranillo, agrupados en la categoría (AN), son más probables cuando se asocian con anomalías positivas (AN) del índice AMO-Niño 3.4 (en junio). En ambos casos, los escenarios seco y húmedo fueron muy poco probables cuando se observaron condiciones de anomalías positivas y negativas en el índice AMO-Niño 3.4, respectivamente.

Por medio del uso de modelos *logit*, se pueden realizar escenarios de probabilidad sobre las condiciones BN, N y AN de la intensidad y magnitud del veranillo, dada una anomalía observada en el índice AMO-Niño 3.4 en el mes de junio. Los modelos ajustados mostraron que el escenario más probable para anomalías negativas (positivas) en el índice AMO-Niño 3.4 es el BN (AN) en la intensidad y magnitud del veranillo. Al observarse la mayoría de las fechas del mínimo de los eventos del *veranillo* en el mes de julio, estos resultados tienen potencial de uso en predicción estacional y los resultados de las Tablas de Contingencia, concuerdan con lo anterior. Sin embargo, para fines de trabajo operativo junio puede presentar algunos inconvenientes en su uso como predictor ya que por lo general los índices AMO y Niño 3.4 pueden estar disponibles una o hasta dos semanas después de finalizado el mes junio, eso quiere decir que los índices de junio podrían estar listos precisamente cuando ya se está registrando el evento del veranillo. Adicionalmente, en los casos en que efectivamente el mínimo (magnitud) se registra en julio, la intensidad puede comenzar en junio o con mayor frecuencia a principios de julio. Lo anterior no invalida el hecho de

que la relación encontrada en este estudio sea predictiva, pero dados los problemas señalados en su uso operacional, se podría explorar el uso de un esquema de prognosis perfecta (Wilks 2011), en donde se puede usar pronósticos para el mes de junio de la TSM para calcular los índices y de esta manera establecer una relación con los aspectos del veranillo estudiados. Nótese que aun así la relación también tiene un uso potencial en diagnóstico.

Se observó que la vertiente del Pacífico es la que reporta mayor cantidad de impactos asociados a déficit de lluvia, junto con temperaturas por encima del promedio cuando se observan condiciones cálidas en el Pacífico ecuatorial del Este y frías en el Atlántico Tropical Norte. Esta información, junto con los modelos predictivos elaborados, podría ayudar en el manejo y prevención de sectores socioeconómicos claves en la cuenca del río Tempisque, como lo son la agricultura (por ejemplo el sector arrocerero) y el suministro de agua potable para zonas residenciales y hoteleras.

Los resultados obtenidos mostraron, que la producción de arroz tiende a estar igual o por encima de su mediana cuando el veranillo no es tan severo y que durante los veranillos severos la producción nacional de arroz se observó por debajo su mediana. Sin embargo, varios cuidados se deben tomar en cuenta al analizar los resultados ya que la producción nacional de arroz es una medida acumulativa de todo un año y que el efecto del veranillo es por uno o dos meses, en función del mismo ciclo fenológico del arroz. Las fechas de siembra se dan aproximadamente en agosto, cuando podría haber pasado lo más severo del veranillo. Además, en el dato de producción anual, se está considerando en la producción nacional el aporte del arroz con riego que no necesariamente es afectado por el veranillo. Por último, en el cálculo de producción se incluyen zonas arroceras fuera de Guanacaste, como en el Pacífico Central-Sur, Caribe Norte y Zona Norte; donde el veranillo es más débil o inexistente. Debido a lo anterior,

los resultados mostrados en la figura 3 podrían más bien indicar que existe un efecto modulador de las lluvias sobre Costa Rica, que impacta una región más amplia que Guanacaste y que esta relación AMO-Niño 3.4 podría estar modulando además las condiciones de precipitación previas al veranillo (e.g. Alfaro *et al.* 2016) y/o posteriores al mismo (Maldonado *et al.* 2013).

Si bien es cierto, el entendimiento de las amenazas climáticas y la elaboración de un pronóstico para el veranillo contribuiría a la planificación de sectores clave, como el arrocerero en Guanacaste, Retana *et al.* (2014) hacen notar, que otras variables además de la climática, deben ser tomadas en cuenta, ya que el rendimiento de un cultivo no depende totalmente del factor clima. Son una serie de variables las que intervienen como son: suelo, genética, manejo, plagas, enfermedades, entre otras. Se ha observado por ejemplo, que sólo el 20% de la variabilidad en los rendimientos de arroz de secano en Guanacaste puede ser explicado por la precipitación y que no todos los eventos cálidos del ENOS producen el mismo efecto. Otro ejemplo es que la intensidad del veranillo explica solo 14% de la variabilidad de la producción de arroz en la figura 3.

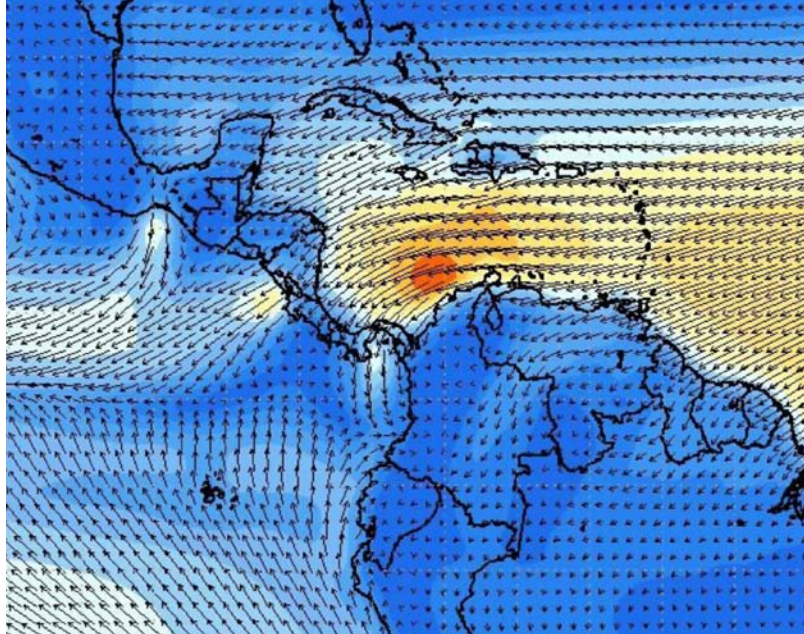
5. Agradecimientos

Se agradece a los siguientes proyectos inscritos en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica que suministraron tiempo y recursos: 805-B7-507, B6-143 (apoyados por VI-UCR y CONICIT-MICITT), B7-286 (apoyado por UCREA), B4-227, B0-065, A9-532 (apoyado por CSUCA-ASDI), A4-906 (PESCTMA-CIGEFI) y B0-810. Gracias a Paula Pérez, Elsie Troyo, Aarón Vega y Francisco Jiménez, por su ayuda con el procesamiento de la información. Los datos de las estaciones usadas fueron suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) y por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

6. Referencias

- Agresti, A. (2002): *Categorical data analysis* (2da Ed.). John Wiley & Sons, United States of America.
- Alfaro, E. J. (2002). Some characteristics of the annual precipitation cycle in Central America and their relationships with its surrounding tropical oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 9, 88-103.
- Alfaro, E. J. (2014). Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*. 62(4), 1-15.
- Alfaro, E.; Hidalgo, H. & Mora, N. (2016). Prediction of MJ rainfall season using CCA models. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 15(2), 5-19.
- Alfaro, E. y Soley, J. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*, 16(1), 59-74.
- Alfaro, E., Soley, J. y Enfield, D. (2003). *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas* (Use of a Contingency Table for Climatic Applications). Guayaquil, Ecuador: ESPOL/ FUNDESPOL.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G. & Magaña, V.O. (2006). Atmospheric forcing in the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 101-142.
- Amador, J.; Durán-Quesada, A.; Rivera, E.; Mora, G.; Sáenz, F.; Calderón, B., & Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific. Part II: seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability. *Revista de Biología Tropical*. 64, S23–S57.
- Enfield, D.B.; A.M. Mestas-Núñez & P.J. Trimble (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*. 28, 2077-2080.
- Fallas-López, B. & Alfaro, E. (2012): Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 1: Análisis de tablas de contingencia. *Revista de Climatología*. 12, 61-79.
- García-Solera, I. & Ramírez, P. (2012). *Central America's Seasonal Climate Outlook Forum*. The Climate Services Partnership, 8 pp. Recuperado de: http://www.climate-services.org/sites/default/files/CRRH_Case_Study.pdf.
- Hernández, K. y 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.
- Herrera, E.; Magaña, V. & Caetano, E. (2015). Air-sea interactions and dynamical processes associated with the midsummer drought. *International Journal of Climatology*. 35, 1569–1578. doi:10.1002/joc.4077.
- Karnauskas, K.B.; Giannini, A.; Seager, R. & Busalacchi, A.J. (2013). A simple mechanism for the climatological midsummer drought along the Pacific coast of Central America. *Atmósfera*. 26, 261–281.
- Magaña, V.O.; Amador, J.A. & Medina, S. (1999). The mid-summer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*. 12, 1577-1588.
- Maldonado, T.; Alfaro, E.; Fallas, B. & Alvarado, L. (2013). Seasonal prediction of extreme precipitation events and frequency of rainy days over Costa Rica, Central America, using Canonical Correlation Analysis. *Advances in Geosciences*. 33, 41-52.
- 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. *Advances in Geosciences*, 42, 35-50. doi: 10.5194/adgeo-42-35-2016.

- Mantua, N.J.; Hare S.R.; Zhang Y.; Wallace J.M. & Francis R.C. (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78, 1069-1079.
- Ramírez, P. (1983). *Estudio Meteorológico de los Veranillos en Costa Rica*. Informe Técnico. Nota de investigación No 5. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Retana, J. (1999). *Posibles efectos de la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur en la agricultura en la agricultura de Costa Rica. Un análisis cualitativo de las estadísticas de producción agropecuaria*. Nota Técnica. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. San José, Costa Rica.
- Retana, J. & Solano, J. (2000). *Relación entre las inundaciones en la cuenca del Tempisque el fenómeno de la Niña y los rendimientos de arroz de secano en Guanacaste*. Nota Técnica. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. San José, Costa Rica.
- Retana, J.; Villalobos, R.; Alvarado, L.; Sanabria, N. y Córdoba, J. (2014). *Seguridad alimentaria y el cambio climático en Costa Rica: granos básicos*. En Tercera Comunicación Nacional. Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica.
- Solano, E. (2015). *Análisis del comportamiento de los períodos caniculares en Costa Rica en algunas cuencas del Pacífico Norte y del Valle Central entre los años 1981 y 2010*. Tesis de Grado. Licenciatura. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Soley, F.J. (1994). Suavizamiento de series cronológicas geofísicas con ruido blanco y rojo aditivo. *Revista. Geofísica*. 41, 33-58.
- Torrence, C. & Compo, G. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 79, 61-78.
- Villalobos, R. (2001). Impacto del fenómeno El Niño sobre la producción de arroz y frijol en dos regiones agrícolas de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 8(1), 19-25.
- Waylen, P. & Quesada, M. (2002). *The Effect of Atlantic and Pacific Sea Surface Temperatures on the Mid-summer Drought of Costa Rica*. En *Environmental Change and Water Sustainability*. J.M. García-Ruiz, J.A.A.A. Jones and J. Arnáez, editors. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Zaragoza, España.
- Wilks, D.S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3ra. Ed.). San Diego, California: Academic Press.



Instituto Meteorológico Nacional

Sitio web:
www.imn.ac.cr

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica

