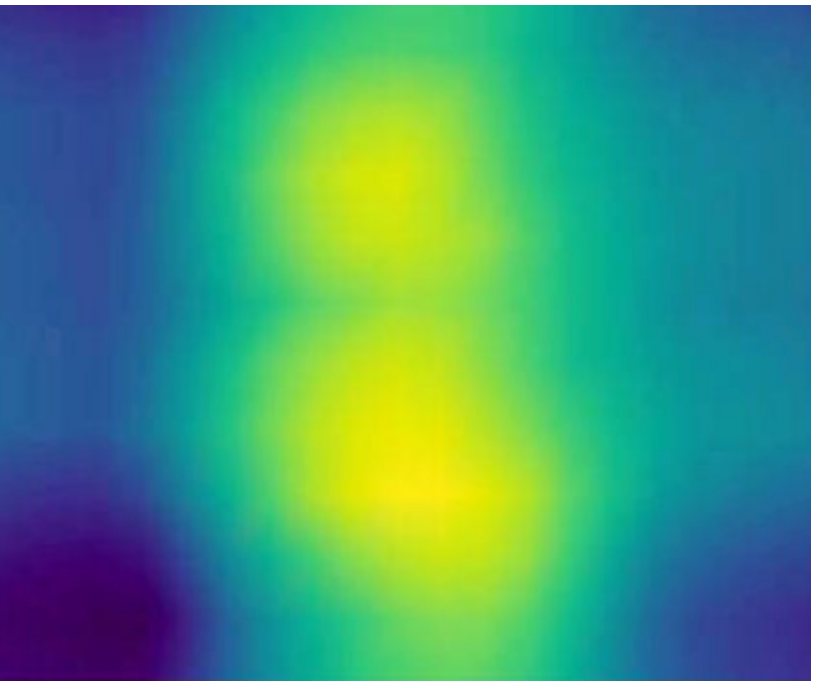
TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

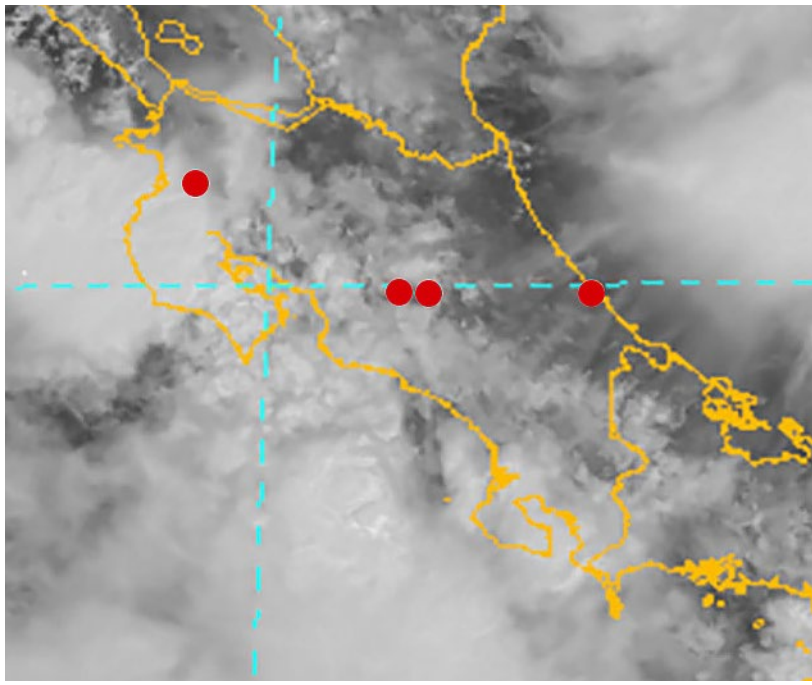
Número 2
ISSN 2953-738X

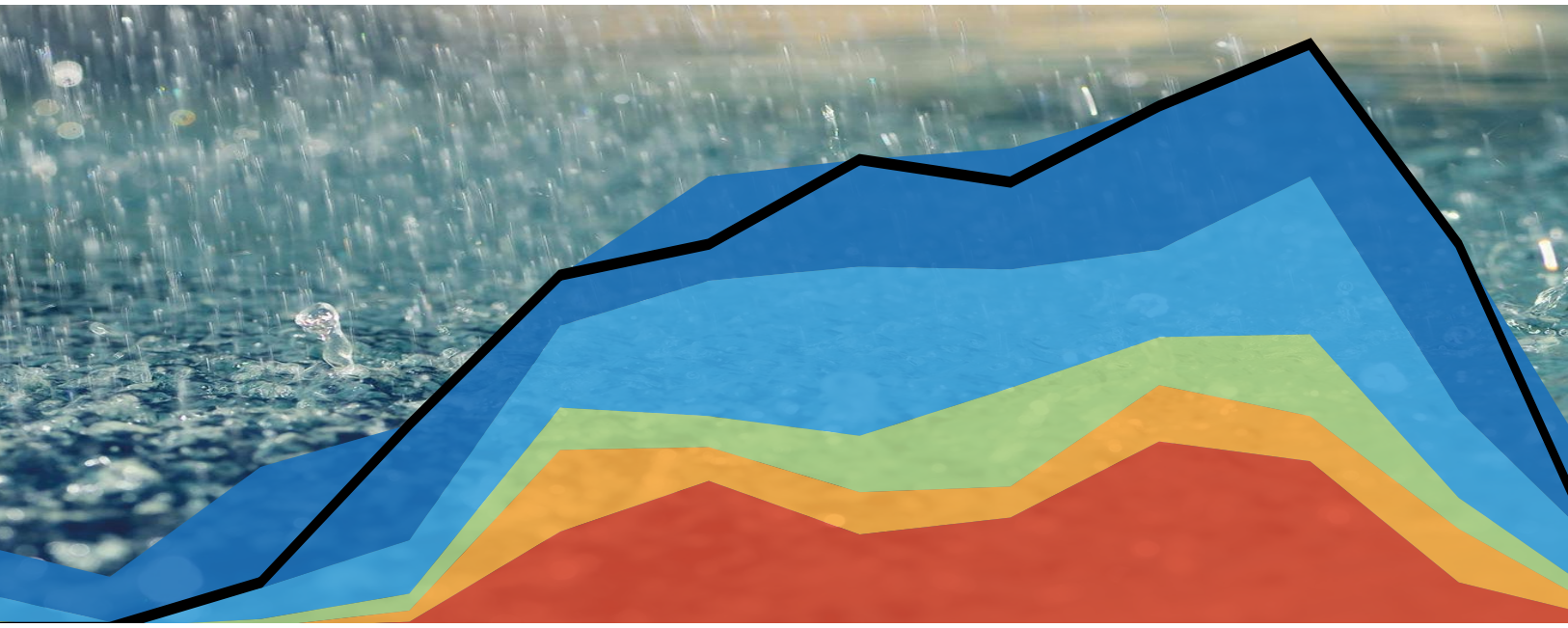
Ministerio de Ambiente y Energía - Instituto Meteorológico Nacional

Instituto Meteorológico Nacional
Fundado en 1888

ISSN 2953-738X | Volumen 19 | Diciembre 2020





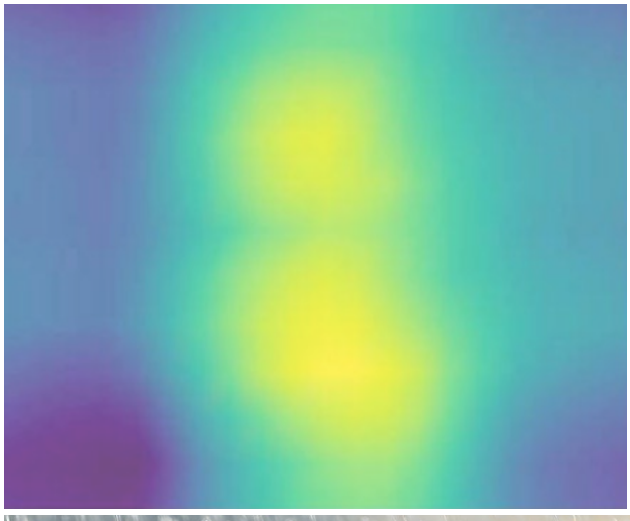


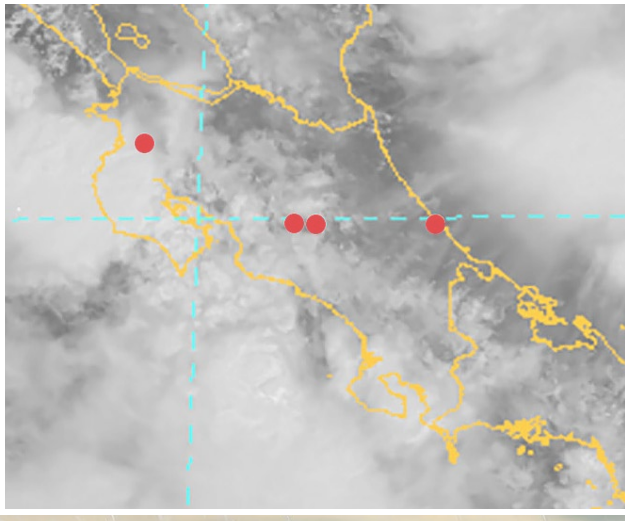
San José, Costa Rica

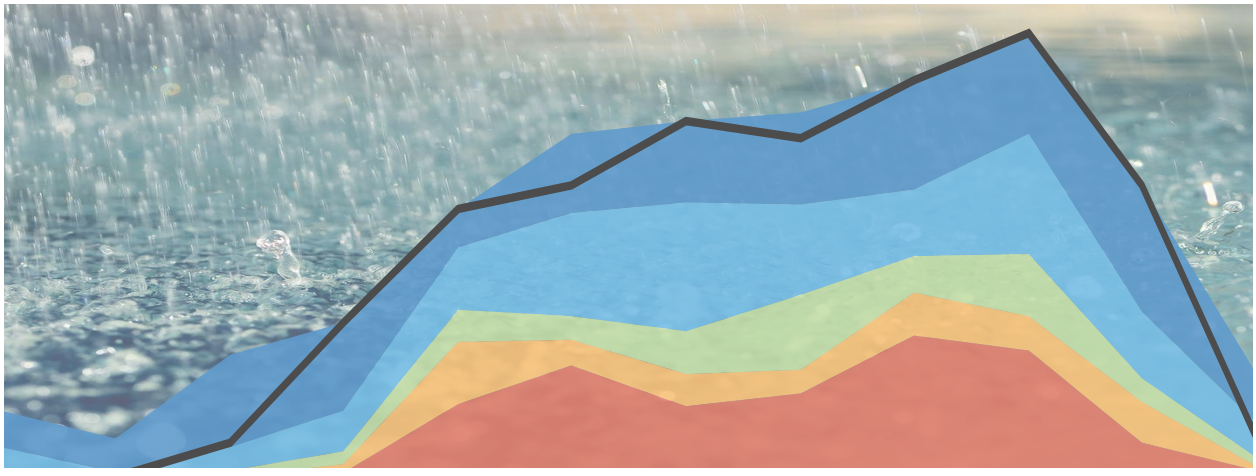
Número 2
ISSN 2953-738X

TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 2953-738X Volumen 19 Diciembre 2020







MINAE
Ministerio de Ambiente y Energía

imn
Instituto Meteorológico Nacional
Fundado en 1888

Ministerio de Ambiente y Energía
Instituto Meteorológico Nacional

Coordinación general:
Lic. Werner Stolz España

Edición:
Dra. Gladys Jiménez Valverde

Comité editorial:
Ing. José Alberto Retana Barrantes
Lic. Luis Fernando Alvarado Gamboa
MSc. Eladio Solano León

Diseño y diagramación:
Rodrigo Granados Jiménez

Imágenes de portada:
Tomadas de los artículos incluidos en esta edición.

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.

* Los artículos publicados en Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos expresan la opinión del autor y no necesariamente del Instituto Meteorológico Nacional

CONTENIDO

Pág. Artículo

5 El extremo lluvioso de 1886 en Costa Rica: el año con más precipitación en la historia de San José
RODRIGO GRANADOS JIMÉNEZ

39 Desviaciones entre predicciones y mediciones de las mareas en Costa Rica, América Central
OMAR G. LIZANO
RODNEY E. MORA ESCALANTE

49 Variables meteorológicas aeronáuticas en los cuatro aeropuertos internacionales de Costa Rica durante la influencia del ciclón tropical Nate
JOSÉ PABLO VALVERDE MORA

68 Análisis estadístico, temporal y espectral de datos meteorológicos de la región de San Ramón, Alajuela
EDUARDO ARIAS NAVARRO
MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ VARGAS

84 Modelos de biomasa y carbono en ecosistemas forestales naturales en Costa Rica
WILLIAM FONSECA GONZÁLEZ
FEDERICO ALICE GUIER
RONNY VILLALOBOS CHACÓN

El extremo lluvioso de 1886 en Costa Rica: el año con más precipitación en la historia de San José

RODRIGO GRANADOS JIMÉNEZ [1]

Resumen

En el año de 1886 ocurrieron en Costa Rica una sucesión de lluvias intensas que impactaron fuertemente la región central del país y los sectores cercanos a esta, convirtiéndolo en el año más lluvioso de la historia de San José desde 1863 hasta 2019. La población se vio afectada por los incidentes generados por el exceso de precipitación, principalmente en el mes de octubre. Este artículo explora las causas de esta inusual temporada lluviosa en la vertiente del Pacífico, para dicho año, las incidencias y daños generados con la evolución de las lluvias en el transcurrir de los meses, entendidas a partir del impacto ocasionado en el contexto de la Costa Rica de finales del siglo XIX. También identifica las zonas geográficas afectadas y describe los principales daños en cada una de las provincias del país.

PALABRAS CLAVE: HIDROMETEOROLOGÍA, EVENTOS CLIMÁTICOS, INUNDACIONES, TEMPORALES, LLUVIAS INTENSAS, HISTORIA AMBIENTAL.

Abstract

In the year 1886 a succession of intense rains occurred in Costa Rica that strongly impacted the central region of the country and the sectors near it, making it the rainiest year in the history of San José. The population was affected in several areas by the incidents generated by excessive rainfall, mainly in the month of October. This paper explores the causes of the unusual rainy season on the Central Valley and Pacific watershed for that year, the incidents and damages generated by the evolution of rainfall over the months, understood from the impact caused in the context of Costa Rica in the late nineteenth century. It also identifies the geographical areas affected and describes the main damage in each of the country's provinces.

KEY WORDS: HYDROMETEOROLOGY, CLIMATE EVENTS, FLOODS, HEAVY RAINS, ENVIRONMENTAL HISTORY.

1. INTRODUCCIÓN

Los temporales son episodios de tiempo caracterizados por lluvias persistentes y de variable intensidad, que suelen durar más de 24 horas o incluso varios días (IMN, 2020). Son habituales en Costa Rica, precisamente por las condiciones geoatmosféricas y oceanográficas que predominan en el territorio. En ocasiones, el temporal conlleva un exceso en la precipitación que puede derivar en un evento hidrometeorológico extremo (EHE).

Según el glosario del IPCC (2018), un evento meteorológico extremo sería cuando en un lugar y época del año, el valor estadístico de la variable climática es superior al percentil 90 o inferior al percentil 10 del patrón observado, especialmente si produce un promedio o un total por si mismo extremo dentro de la variable. Para la precipitación, cuando la cantidad de lluvia sobrepasa los valores umbrales, puede generar eventos hidrometeorológicos extremos (EHE) como sequías o lluvias torrenciales (Retana, 2012)

1 Estudiante de la carrera de Historia en la Universidad de Costa Rica, y genealogista. Departamento de Desarrollo, Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: rgranados@imn.ac.cr

Al ocurrir estos eventos extremos, que son parte de la normalidad del clima, se afectan todas las actividades humanas con sucesos que convierten el factor clima en una verdadera amenaza, tales como crecida de ríos o saturación de los suelos, que pueden ocasionar situaciones de emergencia como inundaciones, erosión de la margen de los ríos o deslizamientos con impactos socioeconómicos graves, como obstrucción de las vías de comunicación, aislamiento temporal de poblaciones, afectación a la economía nacional y pérdidas humanas, entre otros.

Históricamente, Costa Rica ha experimentado emergencias por los excesos en la cantidad de lluvia, los cuales son situaciones recurrentes en muchas poblaciones y periódicas en otras. En los últimos 70 años, la documentación existente permite dar claridad a esas condiciones, creando una mayor conciencia de los efectos del extremo climático. Sin embargo, analizar la historia de los eventos hidrometeorológicos extremos en el país, antes de 1950, es un ejercicio pocas veces realizado, pero sumamente importante para comprender las afectaciones causadas por la lluvia en las diversas regiones del país, los impactos en las sociedades de cada época y para detectar señales de cambio climático.

Al revisar la historiografía ambiental de Costa Rica, que inició en la década de 1960 con algunos pocos estudios, se puede observar que la producción investigativa se duplicó en la década de 1970, repuntó en la década 1980 y se consolidó como disciplina en el país en la década de 1990 con más de 30 investigaciones, generando para el siglo XXI una mayor conciencia de la necesidad de revisar y analizar el pasado ambiental del país (Clare, Goebel y Rivero, 2014). Sin embargo, desde la perspectiva histórica, hay carencia de investigaciones sobre los eventos hidrometeorológicos extremos, que ayuden a entender no solo las emergencias causadas, sino las respuestas de la sociedad al momento de enfrentar los impactos generados.

El año de 1886 se caracterizó por ser extremadamente lluvioso, tal como lo evidencia Goebel (2009), quien señala que fue el año de mayor precipitación en el periodo comprendido entre 1863-1940. Esto coincide con lo indicado por Granados (2020), que documenta una considerable cantidad de incidencias y daños causados para ese año, por la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos durante el siglo XIX.

Con esos datos de antesala y el contexto historiográfico referido, el objetivo de esta investigación fue analizar la temporada lluviosa de Costa Rica, en el año de 1886, con el fin de dimensionar los excesos de precipitación, sus impactos, así como las respuestas dadas por la sociedad y las autoridades de la época.

2. METODOLOGÍA

Los datos de lluvia mensual de 1886 se obtuvieron del Anuario Estadístico de Costa Rica de ese año. Para realizar el análisis de la precipitación, se compararon los datos del año en estudio con dos climatologías, una que se construyó para el periodo 1866-1900 tomando los datos mensuales disponibles en los Anales del Instituto Físico Geográfico de Costa Rica, del Instituto Meteorológico Nacional y de la literatura científica especializada en el clima, y con la climatología base de precipitaciones del periodo 1961-1990 del Instituto Meteorológico Nacional. El análisis de la incidencia del ENOS (El Niño Oscilación del Sur) en las lluvias de 1886, se realizó con base a publicaciones científicas existentes sobre el fenómeno y sus impactos.

La información asociada a los impactos de los eventos hidrometeorológicos extremos ocurridos en el país en 1886, se obtuvo de documentos resguardados en el Archivo Nacional de Costa Rica, los periódicos *La Gaceta*, *Diario de Costa Rica*, *Otro Diario*, *La República*, *El Comercio* y *La Chirimia*, publicados entre el 1 de enero de 1886

y el 31 de enero de 1887, y de la Base de datos de eventos meteorológicos extremos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2019).

Se documentaron 120 incidencias que hacen referencia al impacto generado en la sociedad por los EHE. Los datos se ordenaron conforme a la división administrativa y la regionalización climática vigentes en Costa Rica al 2020. También se usó la categorización de eventos, incidentes y daños definidos en la Base de datos del IMN anteriormente citada.

La ubicación administrativa de lugares o poblaciones que ya no existen o que han cambiado de nombre, se realizó por aproximación, como es el caso de la carretera a Carrillo y la población de Carrillo y su supuesta ubicación cerca de la confluencia de los ríos Sucio y Hondura.

Los sucesos relacionados con sitios geográficos que sirven como división territorial o denominados con nombres en desuso, se categorizaron administrativamente como "sin precisar". Un ejemplo de ello es la afectación en los puentes sobre el río Sucio-Chirripó, que sirve de división político-administrativa entre Cartago-San José, San José-Limón (parte alta de la cuenca) y Heredia-Limón (parte media y baja de la cuenca), y que no estarían ni en una ni en otra provincia, salvo que se mencione alguna localidad afectada a uno u otro lado del río. Sin embargo, si se han categorizado en la distribución por regiones climáticas.

3. RESULTADOS

3.1. *Esbozo del país para 1886*

En el año 1886, toda la Región Central del país sufrió las consecuencias de la rigurosidad e intensidad de la temporada lluviosa, particularmente en su último trimestre. Las lluvias generaron incidencias desde junio hasta noviembre y la afectación se relaciona estrechamente a las condiciones socioeconómicas y técnicas de la infraestructura de la época.

Al 31 de diciembre de 1885, el Director General de Estadística estimaba la población del país en 213.735 habitantes[1], concentrándose el 86,53% en la Región Central. Esta población se duplicaría en tan sólo 40 años; para 1927 Costa Rica contaba con 471.524 habitantes[2].

La sociedad costarricense de esa época se profesionalizaba académica y económicamente, en particular la población del Valle Central de clase acomodada, mientras que el país se institucionalizaba y a partir de 1881 se creaban o estaban por ser constituidas varias instituciones que serían importantes para la profesionalización y tecnificación del país. Las poblaciones rurales mantenían una estructura basada en la agricultura de subsistencia y los menos favorecidos se dedicaban al trabajo por jornal. También en ese año, se daban los primeros cambios promovidos por la reforma educativa promulgada el año anterior y que daría frutos algunas décadas después[3].

En el contexto político, al frente estaba el Gobierno del general Bernardo Soto Alfaro, quien había asumido la dirección del país de manera constitucional el ocho de mayo de 1886, aunque ya gobernaba como primer designado desde el 12 de marzo de 1885, tras la muerte de Próspero Fernández[4]. En los puestos cercanos al presidente destacan, por las carteras que dirigían en ese año y que estarían muy ligados al manejo de la emergencia, que causaría particularmente el temporal de octubre, don Ricardo Jiménez Oreamuno, nombrado el cinco de octubre de 1886 como Secretario de Estado, en los despachos de Gobernación, Policía y Fomento[5]; y don Lesmes Jiménez Bonnafil como jerarca de la Dirección de Obras Públicas, acompañado en la Inspección de Obras Públicas por Odilión Jiménez. En la División Central del Ferrocarril de Costa Rica, la Superintendencia era dirigida por Manuel V. Dengo Bertora, quien estuvo en el cargo hasta diciembre de 1886[6].

Costa Rica se encontraba en una de las épocas de mayor progreso, dirigida por gobiernos de pensamiento liberal desde 1870 y que se mantendrían en el poder hasta 1914. Durante los decenios de 1870 y 1880, el país había desarrollado importantes obras de infraestructura vial.

La ampliación o construcción de caminos y del ferrocarril en 1886, constituían uno de los ejes del desarrollo económico del país, con los que se buscaba hacer más eficiente y menos riesgoso el transporte de productos, principalmente el café, hacia Limón y Puntarenas para su embarque a Europa, Estados Unidos, así como de mercancías de los puertos al interior del país. En agosto de 1886 se inició el tramo final del ferrocarril al Atlántico, con el trayecto Cartago-Reventazón a cargo de la compañía creada por Minor C. Keith, la Costa Rica Railway Company Ltda, con el empleo inicial de 656 peones diarios[7] y el gobierno esperaba la conclusión de la carretera a Carrillo.

La economía del país se había estructurado en un modelo agrario en torno al café, producto que para 1886 representaba aproximadamente el 80% de las exportaciones totales. Tanto se había desarrollado la producción, que para 1887 se estimaban en el país más de 7.400 fincas y 250 beneficios[8]. Con este panorama, no es de extrañar por qué, ante las excesivas lluvias que persistían en el país al mes de noviembre, los diarios publicaban la gran preocupación del sector por las cosechas de café:

> *"El mal tiempo siempre continúa... ...Si esto sigue así por muchos días más, tendremos que lamentar graves perjuicios en las cosechas de café. Ya se nota que en algunas partes empieza a caerse."*[9]

Por otra parte, el cultivo del banano se fortalecía y para 1886, en la región Atlántica se contaba con poco más de 350 fincas bananeras y la actividad ganadera tomaba fuerza a partir de los beneficios que traían las reformas agrarias de la época, como por ejemplo, la realizada en 1885[10] que eliminaba los impuestos de importación a los animales de cría, ganado vacuno, caballar, lanar, porcino y aves de corral.

Además del café y el banano, otros productos que se exportaban en la época en menor cantidad y porcentaje relativo eran: cueros, caucho, carey, oro en barras, plantas y tortugas secas, desde el puerto de Limón, y arroz, añil, cueros, caucho, dulce, frijoles, papas, papel y pieles, desde el puerto de Puntarenas[11].

Con respecto a los servicios públicos, para 1886 el país contaba con cañerías de agua potable en las principales poblaciones y un servicio eléctrico que apenas iniciaba su desarrollo; se había habilitado en San José desde agosto de 1884 con el alumbrado público y apenas en 1886 se trabajaba en el incremento de la producción, en la extensión del servicio a las cabeceras de provincia y la venta a nivel comercial.

En cuanto a los servicios de información, la prensa escrita era abundante y la información publicada ya no era tanto de corte político, sino que había espacio para secciones culturales, sociales, sucesos, humor y anuncios. Existía un servicio telegráfico con 18 años de existencia y una red de comunicación nacional desde Limón hasta La Cruz, atravesando las principales poblaciones y desde San José hacia el norte y el sur a poblaciones como Carrillo, Sarapiquí, Santa María y San Marcos, que transmitía aproximadamente 6.000 mensajes mensuales[12]. Por su parte, la telefonía se inauguró en el país en 1886 con la primera central telefónica, brindando servicio con una docena de líneas que comunicaba la Casa Presidencial con dependencias del gobierno[13].

3.2. *La particularidad lluviosa de 1886*

De acuerdo con el régimen de precipitaciones para el Valle Central y la vertiente del Pacífico costarricense, la época lluviosa se extiende de

mayo a octubre, siendo setiembre y octubre los meses más lluviosos, julio y agosto los meses de veranillo (o canículas) y tanto abril como noviembre son meses de transición[14]. Los reportes de lluvias para 1886, indican que, en junio, en San José y San Ramón, se presentaron fuertes precipitaciones por varios días[15]. Las lluvias se extendieron hasta noviembre y fueron noticia, particularmente en el mes de octubre.

Ese año, la cantidad de lluvia registrada fue considerablemente mayor en todos los meses del año. Solo en San José, la precipitación acumulada fue de 3.843 mm, valor que sobrepasó, como se observa en el cuadro 1, los valores mensuales y el acumulado anual en años anteriores y posteriores a este. Tan intensas fueron las lluvias que, de acuerdo a los registros históricos de precipitaciones para San José desde la estación que tenía el Instituto Geográfico, la del Museo Nacional y ahora la del IMN en barrio Aranjuez (IMN, 2020b), el año de 1886 ha sido el más lluvioso de la historia instrumental en el centro de San José desde 1863 hasta el 2019, tal y como se puede observar en la figura 1.

Del por qué el año en estudio fue tan lluvioso, según reconstrucciones históricas de índices para identificar el fenómeno ENOS (El Niño Oscilación Sur), en el océano Pacífico, el año 1886 fue afectado por la fase fría del evento: La Niña[16]. Se considera que esta fase provoca una mayor cantidad de lluvia en la vertiente pacífica de Costa Rica[17]. La cantidad de lluvia caída en San José ese año, duplicó el promedio anual de precipitación para San José de acuerdo con la línea base 1961-1990 el cual es de 1.896 mm[18], mientras que el promedio para el periodo 1866-1900 fue de 1.775 mm.

Por su parte, La Niña estuvo activa desde abril de 1886 hasta octubre de 1887 y fue catalogada como fuerte[19], factor que determinaría la correlación entre la influencia del fenómeno y la cantidad extrema de precipitación sobre San José, en el año de estudio. De hecho, justificaría el volumen de lluvia en abril de 1886, que como se demostrará más adelante, fue cinco veces mayor de lo acostumbrado, presentando un valor de precipitación promedio para los meses de mayo o junio.

Los datos con los que se reconstruyó la figura 2 indican que La Niña empezó a manifestarse desde febrero de 1886, pero la influencia notoria en el país fue a partir de abril. Además, hay que tener en cuenta que el ENOS es un fenómeno oceánico-atmosférico, y a veces, aunque el indicador de ambos elementos no esté acoplado, los efectos en la precipitación se hacen notar desde que las temperaturas del océano Pacífico registran valores menores al promedio.

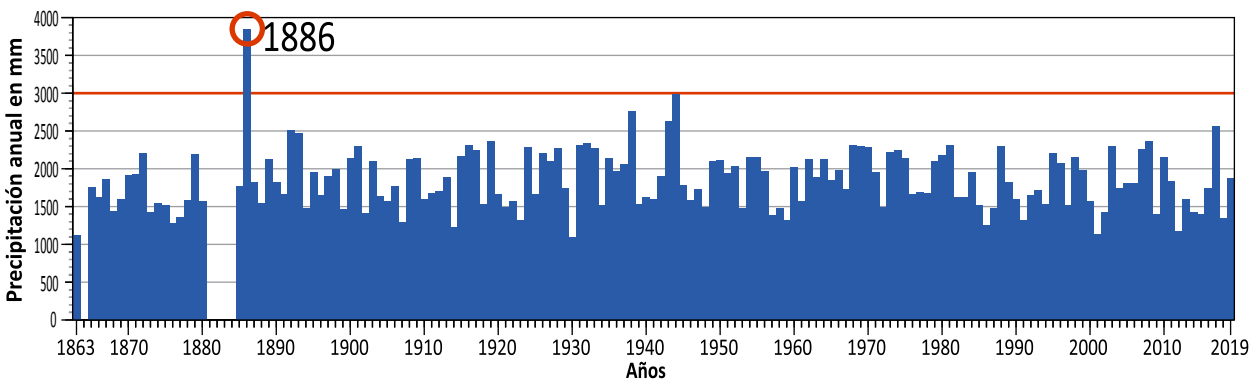


Figura 1. Precipitación anual en San José, Costa Rica, de 1863 a 2019. Fuente: Elaboración propia con datos de Goebel (2009), Anales del Instituto Físico-Geográfico Nacional (1886), Reed (1923), IMN (2020b).
NOTA: Para los años de 1864, 1881, 1882, 1883 y 1884 no se tienen datos.

Cuadro 1. Precipitación mensual y acumulada por año en San José, de 1863 a 1900

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1863	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	**1.119,4**
1864	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	**ND**
1865	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	**1.746,0**
1866	33,0	7,0	0,0	29,0	139,0	123,0	320,0	156,0	274,0	250,0	171,0	122,0	**1.624,0**
1867	98,0	56,0	7,0	98,0	209,0	206,0	214,0	190,0	314,0	213,0	244,0	14,0	**1.863,0**
1868	0,0	0,0	181,0	13,0	83,0	150,0	102,0	130,0	224,0	393,0	144,0	17,0	**1.437,0**
1869	7,0	0,0	7,0	28,0	202,0	218,0	150,0	132,0	393,0	281,0	78,0	102,0	**1.598,0**
1870	1,0	6,0	31,0	17,0	333,0	276,0	240,0	284,0	240,0	262,0	184,0	33,0	**1.907,0**
1871	28,0	3,0	8,0	13,0	290,0	203,0	364,0	307,0	245,0	333,0	114,0	11,0	**1.919,0**
1872	3,0	3,0	15,0	50,0	244,0	255,0	192,0	378,0	397,0	504,0	142,0	21,0	**2.204,0**
1873	64,0	0,0	3,0	71,0	64,0	205,0	145,0	85,0	387,0	262,0	121,0	11,0	**1.418,0**
1874	46,0	1,0	20,0	60,0	336,0	167,0	162,0	181,0	319,0	191,0	42,0	20,0	**1.545,0**
1875	0,0	0,0	0,0	28,0	252,0	180,0	93,0	294,0	279,0	339,0	21,0	32,0	**1.518,0**
1876	14,0	0,0	11,0	6,0	247,0	237,0	153,0	192,0	206,0	117,0	70,0	28,0	**1.281,0**
1877	14,0	0,0	0,0	0,0	240,0	167,0	223,0	159,0	259,0	95,0	121,0	79,0	**1.357,0**
1878	0,0	0,0	38,0	50,0	142,0	187,0	205,0	149,0	329,0	238,0	223,0	20,0	**1.581,0**
1879	13,0	0,0	45,0	192,0	220,0	330,0	460,0	283,0	351,0	231,0	61,0	8,0	**2.194,0**
1880	8,0	0,0	0,0	15,0	254,0	210,0	104,0	436,0	165,0	278,0	92,0	0,0	**1.562,0**
1881	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	**ND**
1882	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	**ND**
1883	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	**ND**
1884	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	**ND**
1885	0,0	0,0	0,0	47,0	151,9	78,0	199,1	98,0	396,0	326,9	412,0	58,9	**1.767,8**
1886	0,0	0,0	52,0	228,0	395,0	428,0	523,0	498,0	582,0	652,0	427,0	58,0	**3.843,0**
1887	0,0	0,0	17,0	7,1	253,0	359,7	142,5	238,8	285,5	334,3	125,2	52,6	**1.815,6**
1888	16,1	18,4	0,0	14,0	179,7	260,0	139,4	157,1	422,0	263,5	51,2	21,8	**1.543,2**
1889	0,3	2,0	73,9	61,3	370,0	205,3	152,8	269,6	429,1	520,0	25,3	11,4	**2.121,0**
1890	22,2	1,6	19,2	64,5	255,6	296,1	397,7	268,3	212,4	202,6	65,2	18,0	**1.823,4**
1891	0,8	0,3	1,3	18,8	108,2	196,0	203,2	249,9	311,6	393,2	141,6	29,4	**1.654,3**
1892	0,0	0,0	3,3	1,8	299,2	382,6	220,9	534,2	377,0	542,6	127,7	11,1	**2.500,4**
1893	1,0	0,0	0,5	12,0	221,7	388,1	353,3	349,4	508,1	379,3	179,4	74,6	**2.467,4**
1894	0,9	0,0	0,0	25,4	203,0	198,9	98,6	248,1	324,7	216,9	148,4	13,7	**1.478,6**
1895	4,0	9,1	1,0	22,4	384,3	314,2	121,1	251,5	292,0	186,4	212,2	153,0	**1.951,2**
1896	53,9	0,0	0,8	132,1	166,7	164,8	208,5	123,3	206,6	200,1	308,6	76,0	**1.641,4**
1897	4,9	0,0	7,0	39,4	310,2	227,5	109,5	399,8	305,9	377,5	78,9	41,1	**1.901,7**
1898	9,4	0,0	6,6	33,0	217,9	396,0	225,7	338,6	351,6	297,3	117,8	1,5	**1.995,4**
1899	43,2	4,5	36,5	32,2	64,7	212,2	402,5	150,7	152,8	171,5	177,1	9,3	**1.457,2**
1900	1,3	0,0	20,6	70,4	175,9	505,2	413,1	79,6	260,3	414,1	165,6	27,7	**2.133,8**

Fuente: Anales del Instituto Físico-Geográfico Nacional (1886 y 1889), IMN (2020b), Reed (1923) y Goebel (2009).

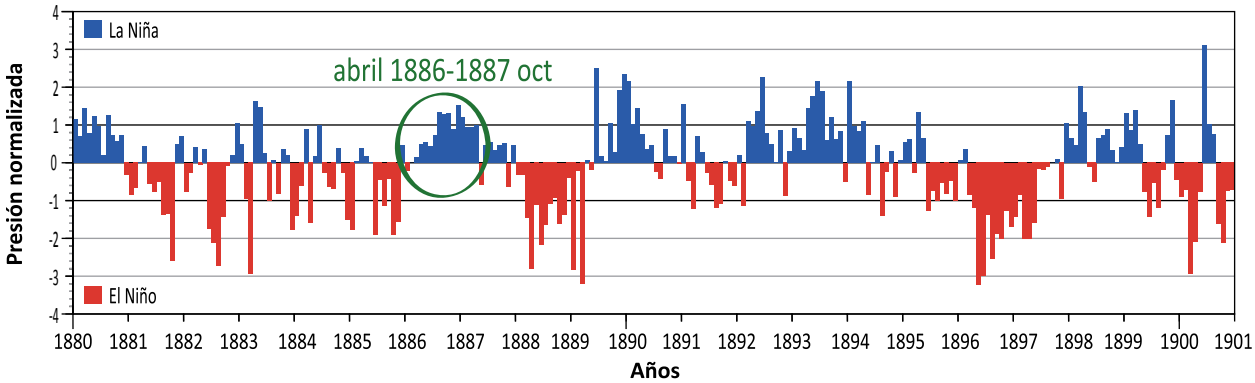


Figura 2. Ocurrencia del ENOS entre 1880 y 1900. Fuente: Reconstruido con datos mensuales de Southern Oscillation Index (SOI) since 1876. Recuperado de http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml

Un factor importante, es que la influencia de La Niña se pudo haber conjuntado en la vertiente del Pacífico con otros fenómenos meteorológicos como: tormentas tropicales, ondas tropicales o bajas presiones, que incrementaron el nivel de lluvia en días muy específicos. Esto es factible dado que para septiembre y octubre de 1886, Cuba estuvo bajo la influencia de un temporal que produjo inundaciones y perjuicios considerables[20]. Según los registros históricos de la NOAA, la isla se vio afectada por tormentas tropicales y huracanes que se formaron en el Caribe, entre agosto, septiembre y octubre de 1886, tal como se muestra en la figura 3. Incluso, en 1886 se presentaron 12 huracanes en el Atlántico y las condiciones meteorológicas previas a su identificación pudieron afectar a Costa Rica, principalmente aquellos que se formaron en el Mar Caribe.

Estos fenómenos, o bien, las perturbaciones meteorológicas que les dieron origen, afectaron indirectamente a Costa Rica. Precisamente, a inicios de octubre de 1886 se presentaron en la Región Central los impactos más fuertes de la estación lluviosa; un temporal que generó muchos daños en un lapso de cinco días.

Con la elaboración de un reanálisis a partir del proyecto "Reanálisis del Siglo XX (20CR) de NOAA-CIRES-DOE"[21] , el cual generó datos atmosféricos globales en cuatro dimensiones desde 1836 hasta 2015, la causa del temporal fue una perturbación tropical que ocasionó el primero de octubre una baja presión de 1.010 hPa al sur de República Dominicana, la cual se fue moviendo hacia el oeste. El día tres se ubicó al sur de Jamaica y al siguiente se intensificó a depresión tropical con 1.007 hPa de presión. Para el día cinco de octubre bajó a 1.003 hPa y se posicionó entre Jamaica y Nicaragua. El seis de octubre se ubicó cerca de la costa de Honduras y la presión bajó a 990 hPa, valor típico de una tormenta tropical o huracán, y el día ocho originó el décimo huracán de la temporada de ese año[22] (número 10 en la figura 3). Tal como se puede apreciar en la figura 4 realizada con reanálisis,

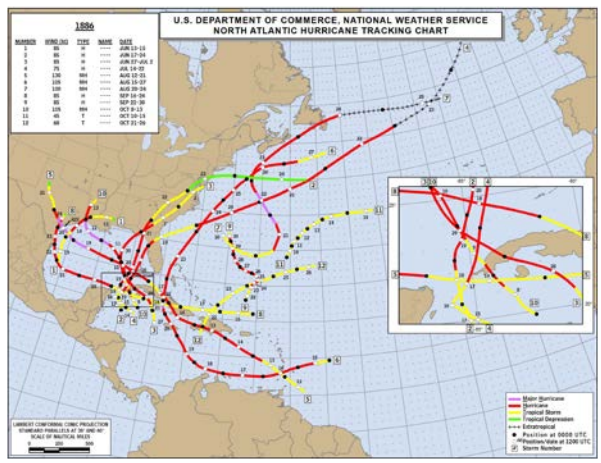


Figura 3. Huracanes y tormentas ocurridas en el Caribe durante 1886. Fuente: NOAA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/tracks/tracks-at-1886.png

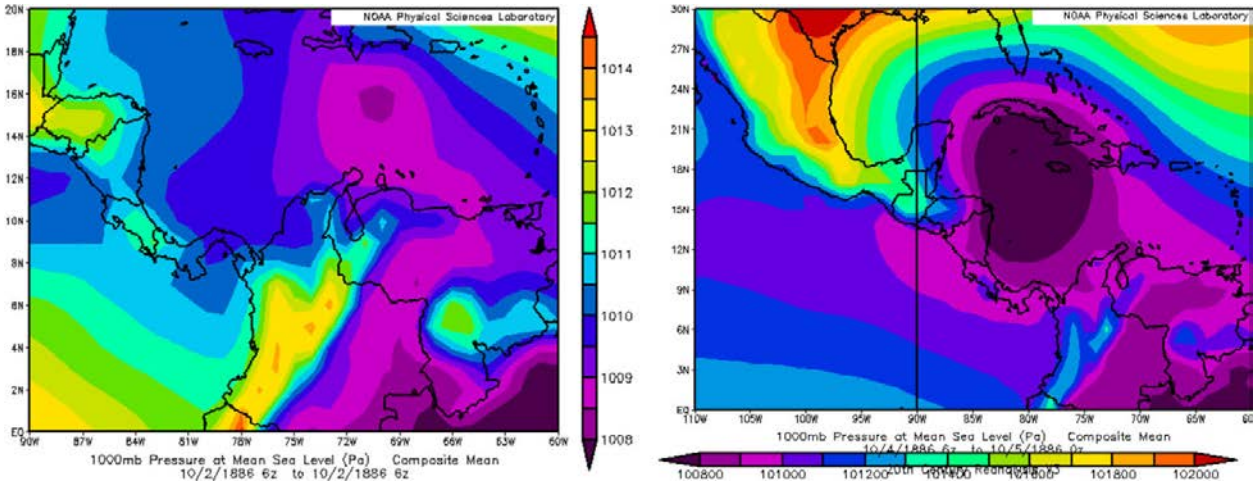


FIgura 4. Estado del campo de presión atmósferica en los días dos y cuatro de octubre de 1886 que habría ocasionado las lluvias a inicios de octubre de 1886 en Costa Rica, reconstruida por el meteorólogo Luis Alvarado con la metodología de reanálisis de la NOAA. Fuente: Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA. Recuperado de https://www.psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/

el área de acción de la baja presión fue muy amplia, factor que causaría las precipitaciones en el país a partir del día tres de octubre, cuando ya se reportaba el temporal en Heredia, como se demostrará en la siguiente sección.

Los datos de lluvias mensuales de San José para 1886, evidencian, no solo la cantidad de lluvia acumulada, sino que todo el año fue particularmente lluvioso en la capital a partir de abril. La cantidad de lluvia sobrepasó los valores promedio esperables y, como se muestra en la figura 5 que compara la precipitación de 1886 con el escenario climático de la climatología de su pertenencia, este resultó ser un año en extremo lluvioso.

Para ilustrar el extremo en las precipitaciones de 1886, se hizo una comparación mensual con dos climatologías robustas: una para el período 1961-1990 (cuadro 2) y otra para el período 1866-1900 (cuadro 3).

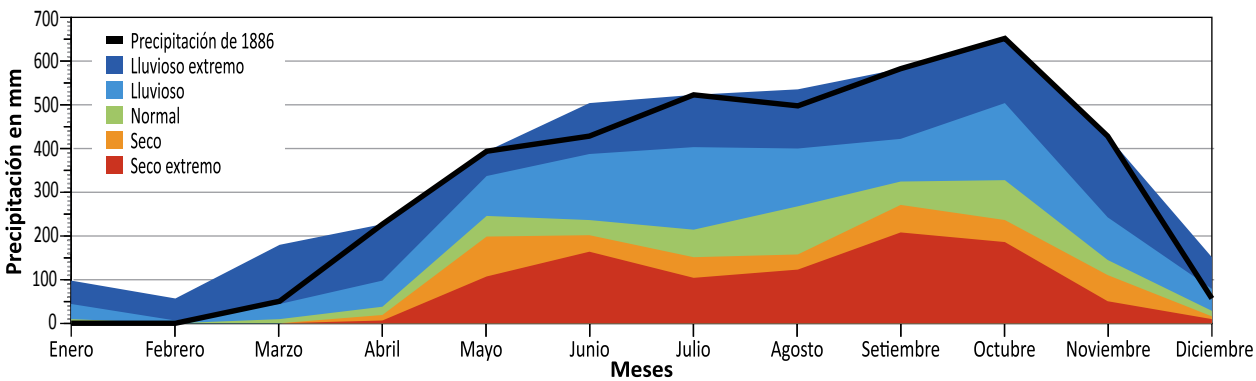


Figura 5. Precipitación del año 1886 en San José comparada con cinco escenarios climáticos. Período de análisis climatológico 1866-1900. Fuente: Elaboración propia con datos del cuadro 1.

NOTA: El escenario climático se construyó a partir del cálculo deciles de precipitación mensual de la climatología, para el periodo 1866-1900, estableciendo los valores extremos conforme lo señalado por el IPCC (2018) y definiendo el límite superior del segmento para el escenario climático así: seco extremo, percentil 10; seco, percentil 30; normal, percentil 60; lluvioso, percentil 90 y lluvioso extremo, el valor extremo de los datos.

Cuadro 2. Precipitación mensual en San José de 1886 y promedio de línea base 1961-1990

MES	Datos de 1886		Línea base 1961-1990		Porcentaje de aumento
	Lluvia en mm	Relación porcentual	Lluvia en mm	Relación porcentual	
Enero	0,0	0,0	10,4	0,5	0,00
Febrero	0,0	0,0	8,3	0,4	0,00
Marzo	52,0	1,4	10,5	0,6	395,24
Abril	228,0	5,9	44,4	2,3	413,51
Mayo	395,0	10,3	212,3	11,2	86,06
Junio	428,0	11,1	282,6	14,9	51,45
Julio	523,0	13,6	206,9	10,9	152,78
Agosto	498,0	13,0	287,6	15,2	73,16
Septiembre	582,0	15,1	348,1	18,4	67,19
Octubre	652,0	17,0	317,2	16,7	105,55
Noviembre	427,0	11,1	129,3	6,8	230,24
Diciembre	58,0	1,5	38,4	2,0	51,04
TOTAL	**3.843,0**	**100,0**	**1.896,0**	**100,0**	**102,69**

Fuente: Anuario Estadístico de Costa Rica de 1886 y Línea base de precipitación 1961-1990, IMN (2020).

Cuadro 3. Precipitación mensual en San José de 1886 y promedio del periodo 1866-1900

MES	Datos de 1886		Promedio 1866-1900		Porcentaje de aumento
	Lluvia en mm	Relación porcentual	Lluvia en mm	Relación porcentual	
Enero	0,0	0,0	16,2	0,9	0,00
Febrero	0,0	0,0	3,7	0,2	0,00
Marzo	52,0	1,4	18,5	1,0	181,73
Abril	228,0	5,9	41,7	2,3	446,59
Mayo	395,0	10,3	220,6	12,4	79,08
Junio	428,0	11,1	243,3	13,7	75,93
Julio	523,0	13,6	217,2	12,2	140,83
Agosto	498,0	13,0	237,1	13,4	110,04
Septiembre	582,0	15,1	307,3	17,3	89,42
Octubre	652,0	17,0	293,8	16,5	121,94
Noviembre	427,0	11,1	138,8	7,8	207,62
Diciembre	58,0	1,5	37,3	2,1	55,62
TOTAL	**3.843,0**	**100,0**	**1.775,3**	**100,0**	**116,46**

Fuente: Anuario Estadístico de Costa Rica de 1886 y Anales del Instituto Físico-Geográfico Nacional.

Al comparar los datos de 1886 con el promedio de precipitación contemporáneo (línea base 1961-1990, cuadro 2), se evidencia que en el mes de marzo de 1886 llovió un 395% más que el promedio, mientras que noviembre fue 230% más lluvioso. Por otro lado, si se compara el año 1886 con su climatología de pertenencia (1866-1900, cuadro 3), se observa que la precipitación de abril fue de un 447% mayor al promedio y un 413% de más con respecto al promedio de la línea base de 1961-1990 (cuadro 2).

Para ambas climatologías de comparación, el año 1886 tuvo un comportamiento lluvioso en todos los meses a partir de marzo, con excesos de más del 50% de lluvia. Por ejemplo, julio fue 140% más

lluvioso que el promedio, incluso, la lluvia aumentó con respecto al mes anterior y posterior cuando lo normal es lo contrario, efecto que se aprecia en los cuadros 2 y 3 al analizar la precipitación de dicho mes. Según indica el meteorólogo Luis Alvarado, "en 1886 no hubo veranillo o canícula en julio y en general, el régimen estacional de lluvias de ese año cambió significativamente, pues normalmente se dan dos picos o máximos de lluvia, uno en junio y el otro en octubre, con un pronunciado veranillo en julio. Sin embargo, eso cambió en 1886, pues solo hubo un pico de lluvia y sin veranillo"[23].

Si se compara la proporción de incremento de las lluvias de 1886, con respecto al promedio de 1866-1900 y la línea base 1961-1990, es notoria la similitud en relación al incremento de la precipitación. Por ejemplo, en ambas líneas comparativas, abril y noviembre, fueron los meses de mayor incremento porcentual con respecto a su valor promedio (cuadro 4).

Las lluvias de ese año fueron superiores, no solo con la línea base actual para Costa Rica de 1961-1990, sino con el promedio de precipitaciones del periodo 1866-1900, tal como se observa en la figura 6. En dicha figura, se puede ver claramente que las climatologías con las que se compara 1886 son muy similares, lo que demuestra, no solo la coeherencia de la comparación, sino que el promedio de las climatologías utilizadas, distanciadas en 100 años, ha sido muy semejante, a pesar de los incrementos apreciables en los meses de junio, agosto y septiembre.

Cuadro 4. Precipitación anual en Rivas, Nicaragua de 1880 a 1896

Año	Precipitación en Rivas, Nicaragua
1880	1 635,3
1881	2 011,9
1882	1 557,5
1883	1 264,2
1884	1 390,4
1885	878,6
1886	2 215,1
1887	1 902,2
1888	1 412,5
1889	2 142,7
1890	808,0
1891	1 677,2
1892	1 988,1
1893	2 695,7
1894	1 201,9
1895	1 211,1
1896	1 214,1

Fuente: Reed (1923).

En la figura 7, se muestran las variaciones positivas del año 1886 en comparación con la climatología de 1866-1900, mientras que en la figura 8 se presenta la comparación de las anomalías de precipitación de 1886, obtenidas de los promedios de las dos climatologías utilizadas.

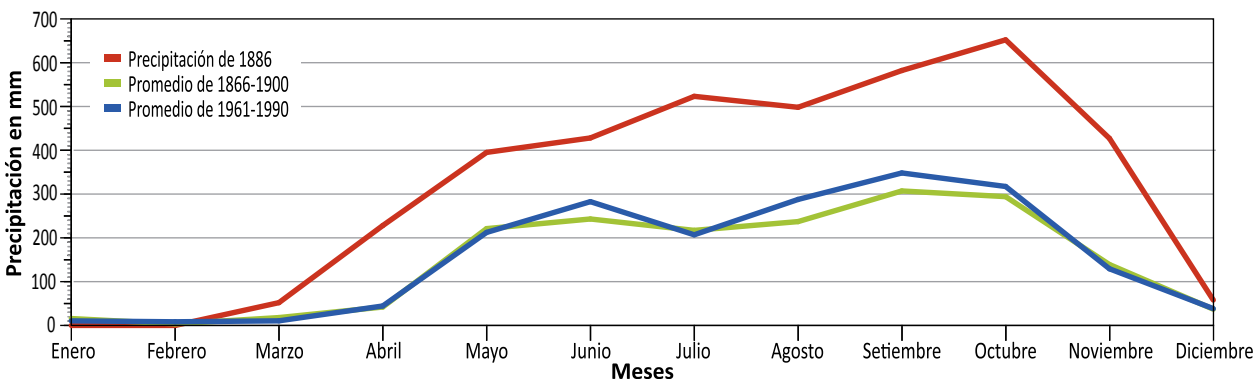


Figura 6. Precipitación mensual de San José en 1886 contra el promedio de 1866-1900 y 1961-1990. Fuente: Elaboración propia con datos de los cuadros 2 y 3.

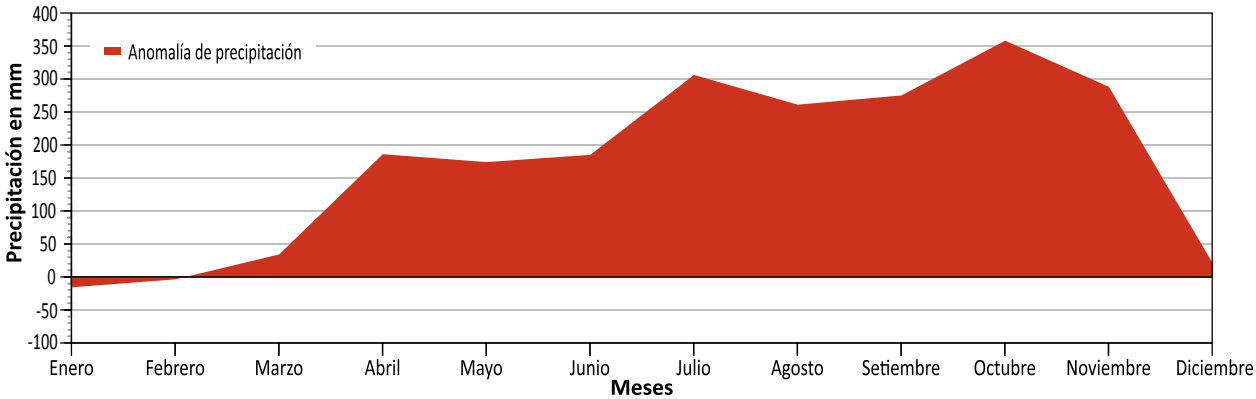


Figura 7. Anomalía en la precipitación mensual de 1886 en San José respecto a la climatología 1866-1900. Fuente: Elaboración propia con datos del cuadro 3.

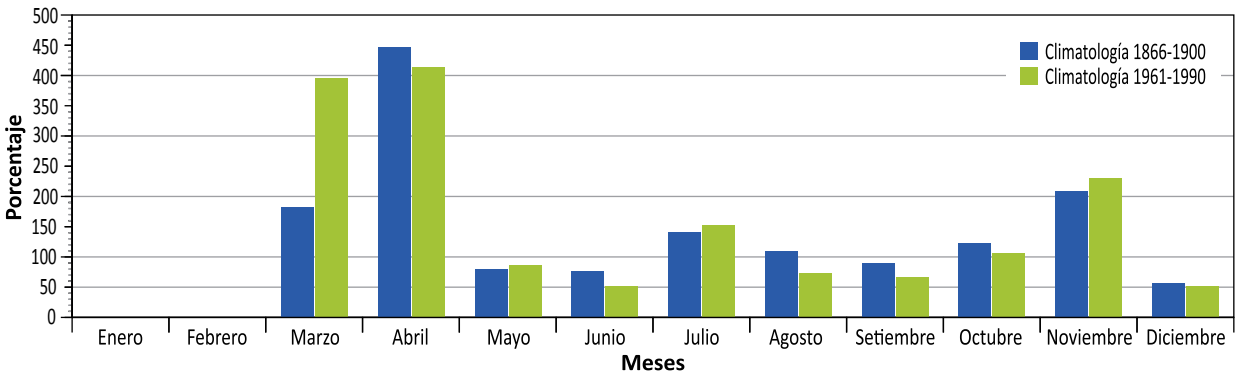


Figura 8. Anomalía porcentual de la precipitación mensual de 1886 en San José tomando como referencia las climatologías de 1866-1900 y 1961-1990. Fuente: Elaboración propia con datos de los cuadros 2 y 3.

No se tienen datos de precipitaciones del año de estudio para otras regiones del país, que permitan dimensionar la influencia de La Niña y las lluvias consecuentes. Al carecer de información para Guanacaste, se recurrió a los datos de precipitación de Rivas, Nicaragua (cuadro 4), región categorizada como bosque seco al igual que parte de Guanacaste, como un posible indicador del comportamiento de la precipitación en la región Pacífico Norte.

Al comparar la precipitación anual de 1886 en San José y Rivas, se puede notar que la cantidad de lluvia fue mucho menor en Rivas que en la capital de Costa Rica. Empero, al analizar el comportamiento de las precipitaciones entre 1880-1896 (figura 9), se evidencia la eventual influencia de La Niña en el año de estudio, ya que es el segundo más lluvioso en el registro de Rivas y el máximo lluvioso para el registro de San José. Otros años bajo la influencia de La Niña y que también fueron lluviosos en ambas ciudades son: 1889, 1892 y 1893.

Los datos de precipitación de Rivas sugieren que, a pesar de que no se tiene información de lluvia para Guanacaste en ese periodo y considerando que Rivas es una región climática de comportamiento similar al Pacífico Norte costarricense, en 1886 si hubo un aumento en las lluvias con respecto a años anteriores, específicamente en los años afectados por La Niña.

Con la metodología del reanalisis, el meteorólogo Luis Alvarado realizó una estimación de la cantidad de lluvia que pudo haber caído en Guanacaste,

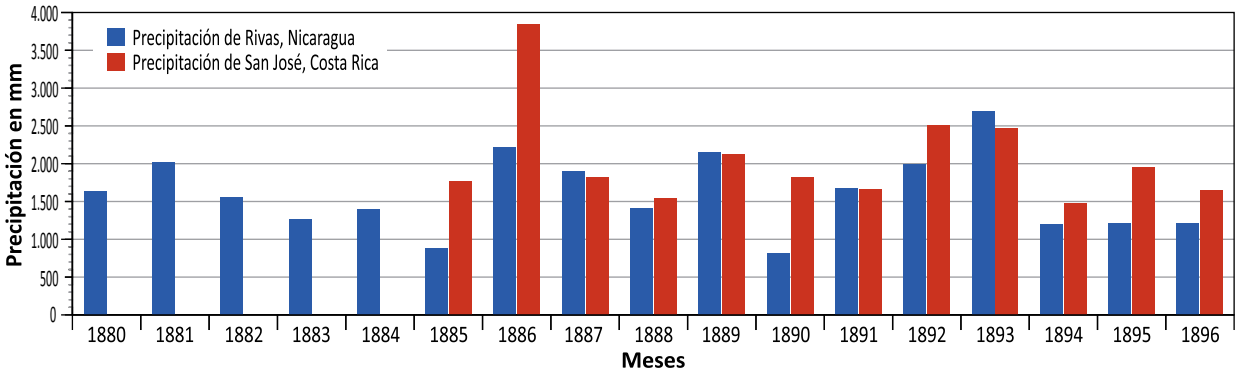


Figura 9. Comparación de la precipitación de Rivas, Nicaragua y San José, Costa Rica entre 1880 a 1896. Fuente: Elaboración propia con datos de los cuadros 1 y 4.

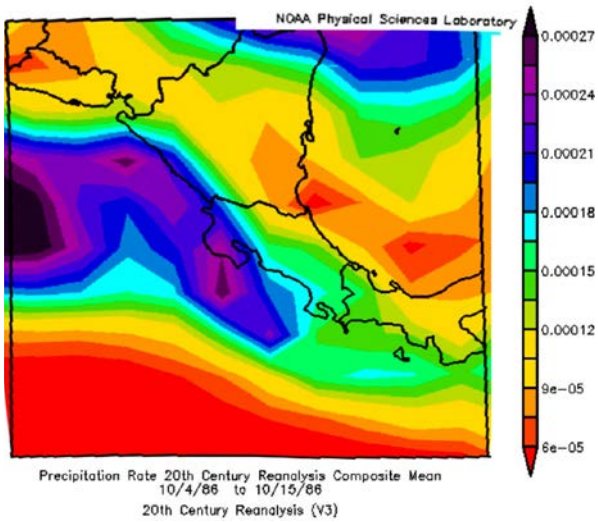


FIgura 10. Estimación de la precipitación para Costa Rica del 4 al 15 de octubre de 1886, reconstruida por el meteorólogo Luis Alvarado con la metodología de reanálisis de la NOAA. Fuente: Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA. https://www.psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/

para el periodo comprendido entre el cuatro y el 15 de octubre de 1886, detectando con ello, que la zona más lluviosa para los días del temporal de octubre pudo haber sido la península de Nicoya (ver figura 10)[24]. Al comparar la proyección del mapa, se puede observar que la región donde se ubica la ciudad de Rivas, Nicaragua, quedaría fuera del área de mayor precipitación pero si en la zona de considerable influencia, como lo fue la Región Central del país.

3.3. *Evolución de las lluvias*

De acuerdo con los datos pluviométricos de San José, la temporada de lluvias de 1886 inició en abril alcanzando los 228 mm, adelantándose a la tradicional entrada de lluvias del mes de mayo. Informes de funcionarios públicos correspondientes a los meses de junio y julio, aluden al "fuerte invierno y las constantes lluvias" que afectaban desde mayo. Las primeras referencias de afectación corresponden a un temporal en San Ramón[25] y lugares circunvecinos, y a las lluvias caídas en la capital: "El invierno se ha presentado furioso. Durante la tarde del domingo [20 de junio] llovió mucho y hubo frecuentes descargas eléctricas[26]". La aseveración de "furioso" deja de ser subjetiva para la época, ya que al comparar los datos del cuadro 2 de la sección anterior, junio resultó ser un 50% más lluvioso en San José de lo esperado.

El mes de julio también fue muy diferente, en cuanto a precipitación se refiere. Al compararlo con las climatologías anteriormente mencionadas, se encontró que tuvo 300 mm de lluvia sobre el promedio y que en agosto llovió un 73% más. Aún así, la cantidad de lluvia caída entre mayo y julio parece no haber incidido tanto en la cotidianidad de la población, a excepción de la afectación en los caminos, que al ser de tierra y lastre, el deterioro por la lluvia era constante, tal como se extrae del informe del Director e

Inspector General de Obras Públicas, Lesmes Jiménez, sobre la ejecución de trabajos realizados en la carretera nacional Cartago-Puntarenas, en los meses de mayo a julio para el trayecto de San Mateo a la Boca del Monte:

> *"Este trayecto no ha podido menos de sufrir gran perjuicio, a causa del fuerte invierno que bruscamente se ha desatado; sin embargo, se mantiene en estado de tránsito y se ha procurado hacer formales las composiciones"*[27].

Las precipitaciones aparecieron con mayor intensidad en septiembre, superando los 500 mm y se fueron incrementando hasta el mes siguiente que alcanzaron los 652 mm en San José, cuando sobrevino el mayor impacto entre el tres y el ocho de octubre. En la tercera semana del noveno mes del año, el invierno se reportaba como riguroso y generaba perjuicios en los caminos.

Aún con la persistente inclemencia del tiempo, la autoridad competente no dejó de atender la composición de los caminos[28] por el rol neurálgico que tenían para la economía de la época, en especial la carretera nacional y la carretera a Carrillo. También, en septiembre, la Dirección General de Telegrafía reportaba algunos daños al servicio que brindaban:

> *"…hubo cinco interrupciones en el telégrafo que duraron de cuatro a seis horas cada una, ocasionadas por las ramas que con la fuerza del invierno cayeron en los puntos donde aún no se ha hecho obra a la línea. Como el invierno en el mes de octubre probablemente será más riguroso, pienso que las interrupciones se repetirán y serán de más duración, por motivo de que los ríos no darán paso a los guardas"*[29].

En la clase obrera de contratación a destajo, septiembre implicó para algunas personas menos ingresos. Por ejemplo, en la construcción del trayecto final del ferrocarril al Atlántico, que en ese mes estaba en el tramo Paraíso-Santiago, se evidenciaba el efecto del mal tiempo:

> *"El tiempo durante el mes no ha sido tan favorable para los trabajos, como el de agosto, y por eso aparece menor número de jornales en septiembre; según las apariencias ahora todavía será peor el tiempo para el trabajo durante el siguiente mes* [octubre]*"*[30].

A inicios de octubre, se intensificaron las lluvias con el conocido popularmente "Cordonazo de San Francisco". Los fuertes aguaceros ejercieron presión en los suelos, lo cuales, ya saturados, cedieron a la acumulación de agua y se presentaron considerables deslizamientos de tierra. Las lluvias sobrevinieron en toda la Región Central y en parte de las regiones del Pacífico Central, Pacífico Norte, Zona Norte y Caribe Norte. El temporal, que tuvo una duración de cinco a seis días, inició el tres de octubre, reportándose esa fecha desde Heredia, y en Cartago, San José, Aserrí y la Zona de los Santos, el cuatro de octubre:

> *"A consecuencia del fuerte temporal que ha habido en estos lugares* [Zona de Los Santos] *desde el día cuatro del corriente, fueron destruidos el puente de San Marcos que había al sur de esta población sobre el río Parrita y el de Santa María sobre el mismo río"*[31].

El mismo fue tan intenso que generó alerta, luego emergencia y dejó muchos daños. Su impacto fue tan notable en el país que, en los diarios que circulaban en la época, se mantuvo información relacionada a su ocurrencia hasta principios de diciembre. El intenso temporal se percibía así para el redactor del diario *La Chirimia,* el nueve de octubre:

> **La cuerda de San Francisco** *este año nos ha castigado muy duro. El temporal ha sido bastante fuerte y ha habido derrumbos, puentes y casas caídas, y muchos otros daños en casi toda la República. Las vías de comunicación han sido obstruidas por falta de puentes caídos. ¡Todo se derrumba en la vida!, hasta las peñas del río Sucio*[32].

Según las notas de prensa, ese año las crecidas de los ríos fueron "extraordinarias", se reportaron desde Liberia hasta Cartago y provocaron bastantes inundaciones. Por la cantidad de lluvia caída y los daños causados, el temporal fue calificado como de "riguroso invierno", término habitual a finales del siglo XIX para referirse a los temporales que generaron afectación, sin pensar, que ese año llegaría ser el más lluvioso de la historia en San José.

El redactor de *La República*, a partir de los reportes suministrados a dicho diario, manifestó el día siete de octubre que parecía que "las lluvias han sido más recias en Cartago que entre nosotros [San José]"[33], sin embargo, esa apreciación no tendría fundamento ya que, en ese momento, la redacción carecía de información de otras regiones. Posteriormente sería evidente que el temporal generó mucha lluvia y daños en toda la Región Central del país.

El crudo invierno no duró mucho en generar preocupación. Al tercer día de las copiosas lluvias de octubre, La República así lo manifestaba:

> *"TIEMPO —Es muy notable y hasta alarmante el rigor del presente invierno. — Las lluvias son tan frecuentes y abundantes, que la agricultura se siente amenazada de sufrir considerables perjuicios, y el pueblo, de llegar a tener que soportar escasez en los artículos de primera necesidad"*[34].

El seis de octubre se temía que por tanta lluvia, la población fuera a verse seriamente afectada en diversos aspectos, en particular las clases "menesterosas"[35]. El temor no sería en vano, al día siguiente, hubo escasez de productos y especulación de precios en el mercado de Cartago[36].

El día siete de octubre, el mismo diario publicaba la siguiente nota referida a San José:

> *"El tiempo lluvioso continúa invariable. El agua caé con una copiosidad admirable... ...El tráfico por las calles está casi suspendido, a causa de la abundancia de agua*[37].

A inicios de noviembre, la lluvia aún estaba presente en la Región Central. En San José había momentos de tiempo soleado, pero luego se nublaba y sobrevenía la lluvia y por ello, la preocupación persistía en la producción agrícola; los cafetaleros temían por la cosecha si el temporal se extendía por más días, debido a que por la constante lluvia en algunos cafetales se empezó a caer el grano[38]. Durante este mes, las lluvias fueron de menor intensidad y frecuencia que en el mes de octubre, pero en cantidad considerable para llegar a sobrepasar lo habitual. En la población se percibía la salida del "invierno".

Para diciembre, las lluvias volvieron a la normalidad de la época y muy pronto la población centró su vida en la "entrada del verano": la estación seca. En la capital sobrevino uno que otro aguacero inesperado, como el suscitado el 30 de diciembre después de las tres de la tarde:

> *"...después de haberse dejado oír algunos truenos en las alturas de la atmósfera, se desató la lluvia en abundantes raudales. Llovió copiosamente como si fuera invierno, hasta más de media noche. Durante la lluvia se notaba que hacía extraordinario calor"*[39].

Como la atípica lluvia dejó daños de consideración en el país, con especial afectación en las vías de

comunicación y lo relacionado a ellas, el editorial de *La Gaceta* del cinco de enero de 1887, titulado: 1886, el cual reseñaba los logros del Gobierno durante el año concluido, no dejó por fuera las inusuales lluvias:

> *"Si no hubiese habido que lamentar contratiempos naturales e inevitables durante el año pasado, no vacilaríamos en darle el epíteto de feliz;* ***pero la estación de lluvias, rigurosa como en pocos años se ha mostrado****, por el exceso de ellas originó daños de consideración en puentes valiosos, interrumpiéndose por ese motivo el tráfico normal en la más importante de nuestras vías de comunicación"*[40].

3.4. *Incidencias e impactos de las lluvias en 1886*

3.4.1 Generalidades

En los últimos tres meses de la temporada lluviosa, que en 1886 incluía el mes de noviembre que generalmente es de transición, se generó el 83% de las incidencias documentadas. El mes de octubre concentró las dos terceras partes de los daños, en su mayoría asociadas al temporal que inició entre el tres y el cuatro de octubre (ver figura 11).

Los efectos directos de las lluvias sobre la estructura vial (deterioro de los caminos por el exceso de lluvia, lodazales o barriales, huecos y terrenos falseados), representó casi una cuarta parte de todas las incidencias de 1886 (ver cuadro 5). Si a eso se añade que el 36% de las incidencias fueron derrumbes, inundaciones, crecidas de ríos y cabezas de agua, y que algunas de estas impactaron directamente a los puentes, los caminos, las carreteras y la línea férrea; los daños específicos en las vías de comunicación representaron el 52% de los perjuicios generados por las lluvias (columna daños, cuadro 5). Muchos quedaron inutilizados, por lo que tuvieron que ser intervenidos continuamente para habilitar su tránsito.

Incidencias de importancia fueron los deslizamientos o derrumbes, las cabezas de agua y la crecida de los ríos. Un 17% de los datos corresponde a informes de situación de jefes políticos, alcaldes, inspectores o corresponsales de prensa (ver cuadro 5), en los que se reportan diversos daños, algunas veces sin precisar la incidencia que generó la afectación o reportan datos de costos por reparación de caminos.

La incidencia en los servicios públicos implicó daños en el abastecimiento de agua potable y la suspensión del servicio de telégrafo por algunas horas o hasta por varios días. Las incidencias relacionadas a la vegetación aluden a daños como caída de árboles por el viento, la erosión del suelo y daños en la agricultura.

La infraestructura residencial y comercial de 1886, no tan sólida como la existente en la actualidad, también salió perjudicada: la

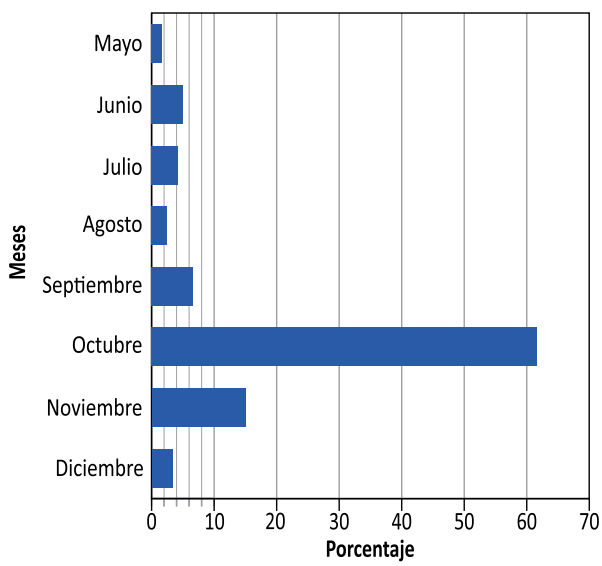


Figura 11. Incidencias identificadas por mes en la temporada lluviosa de 1886, en Costa Rica. Fuente: Elaboración propia con datos de IMN (2019) y Granados (2020).

Cuadro 5. Incidentes y daños ocurridos por los temporales de 1886 en valor porcentual

Incidente	Porcentaje
Efecto sobre la infraestructura vial	22%
Informe de situación	17%
Deslizamientos (derrumbes)	14%
Crecida de ríos	14%
Inundación	7%
Servicios públicos	6%
Efecto sobre la infraestructura residencial	5%
Interrupción de actividades	4%
Salud pública	3%
Afectación a la vegetación	3%
Cabeza de agua (o aluvión)	2%
Efecto estructural	1%
Erosión de la margen de ríos	1%
Otros	1%
TOTAL	100%

Daño	Porcentaje
Carreteras y caminos	25%
Puentes	22%
Casas	8%
Reporte de amenaza	8%
Suspensión de actividades	6%
Líneas de telégrafo	6%
Personas afectadas	5%
Línea férrea	5%
Sin reportes de daños	4%
Agropecuario	3%
Daños materiales	3%
Negocios comerciales	2%
Salud	1%
Otros	2%
TOTAL	100%

Fuente: Elaboración propia con datos de fuentes históricas, IMN (2019) y Granados (2020).

cantidad de agua caída colapsó los desagües de los tejados, provocando daños en los techos, desestabilizó paredes y tapias al punto de que algunas se cayeron. También ocasionaron que casas estructuralmente no muy sólidas o viejas, terminaran por desplomarse.

Retomando el dato poblacional, Costa Rica contaba para 1886 con poco más de 200.000 habitantes, de los cuales el 55,37% se ubicaba en las provincias de San José y Alajuela, mientras que el 44,73% restante en las otras regiones, mayoritariamente en Cartago y Heredia. Al analizar la concentración por provincia de las incidencias documentadas, destaca que el valor porcentual de la distribución poblacional del país por provincia, se asemeja mucho al valor porcentual de procedencia de los reportes (ver figura 12), donde San José y Alajuela concentran el 52,94% de los impactos causados por los temporales.

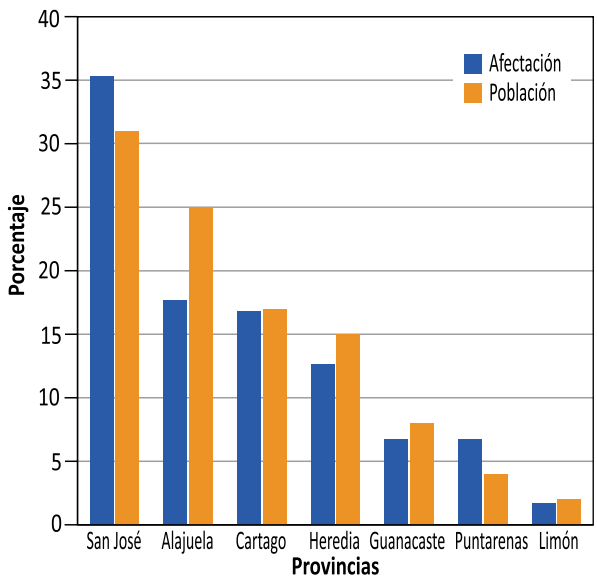


Figura 12. Afectación por el temporal de 1886, comparada con la población por provincia. Fuente: Elaboración propia con datos de IMN (2019), Granados (2020) y Calvo (1886).

Los reportes están asociados al impacto que tienen los eventos en las personas y en cómo se registran éstos en función del poblamiento de las regiones. A pesar de que la proporción de los reportes no es idéntica a la relación porcentual de la población, es evidente que los reportes de afectación mantuvieron una relación con la distribución demográfica del país para 1886.

3.4.2 Distribución espacial de los impactos

Las lluvias se registraron en la vertiente del Pacífico y afectaron mayoritariamente la Región Central, la cual sufrió el 60% de los daños documentados (ver figura 13). La Región Pacífico Norte registró un 18% de afectación, mientras que el Pacífico Central, Zona Norte, Caribe Norte y Caribe Sur registraron en conjunto el 22% de los daños, con la peculiaridad de que los lugares con afectación documentada, corresponden a localidades cercanas a los límites de la Región Central. De la Región Pacífico Sur no se encontraron datos.

Con la información colectada se determinó afectación concreta en seis provincias, 33 cantones y 46 distritos. De la provincia de Limón hay menciones de afectación en la "línea" (trayecto Carrillo-Limón), pero sin mención de lugares concretos. Los cantones con mayor cantidad de daños documentados fueron: San José, Heredia, Cartago, Vásquez de Coronado y Aserrí (ver figura 14), mientras que los distritos o poblaciones fueron: San José, Heredia, Cartago, Dulce Nombre de Jesús (propiamente el poblado de Carrillo, que habría estado ubicado en el límite norte de este distrito en el cantón de Vásquez de Coronado), Aserrí y Barva. La figura 15 muestra la distribución espacial de los cantones y distritos afectados por las lluvias en el país en 1886.

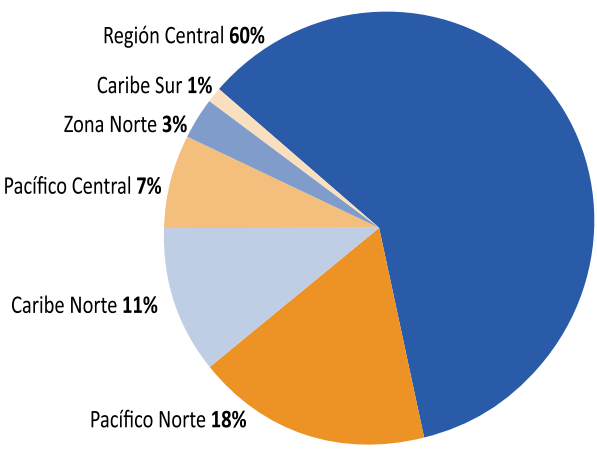


Figura 13. Distribución porcentual por región climática de los daños generados en la estación lluviosa de 1886, en Costa Rica. Fuente: Elaboración propia con datos de IMN (2019) y Granados (2020).

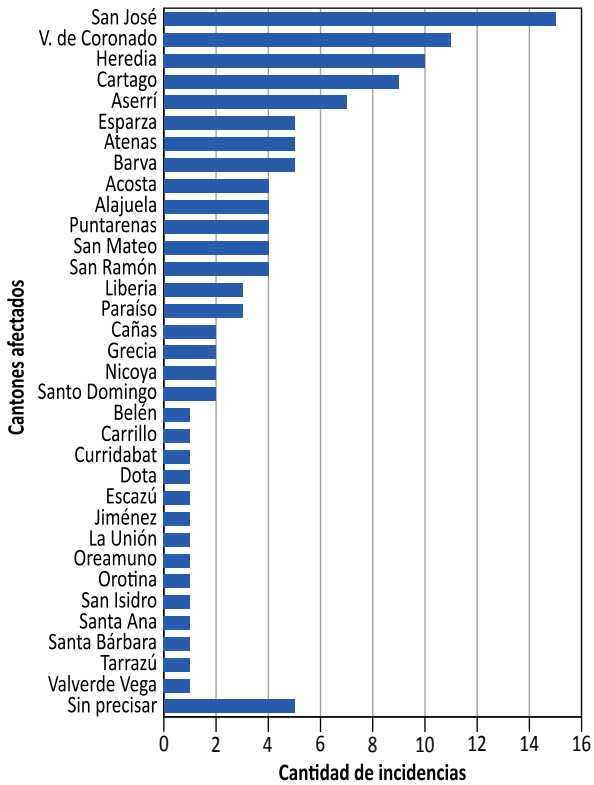


Figura 14. Cantidad de incidentes por cantón afectado por las lluvias de 1886. Fuente: Elaboración propia con datos de IMN (2019) y Granados (2020).

3.4.3 Efectos en la salud

La amenaza del temporal sobre el bienestar de la ciudadanía también era de preocupación[41]. El riesgo latente consistía en la aparición masiva de resfriados y "romadizos" (inflamación de la mucosa de las fosas nasales).

Es posible que las lluvias excesivas contribuyeran con la aparición de fiebres y calenturas en el transcurso del año, algunas más notables que otras. En la Región Central hubo episodios epidémicos de fiebre palúdica en septiembre, en los distritos de Tucurrique y Orosi. En el Pacífico Norte, en lugares como Nicoya, Bagaces

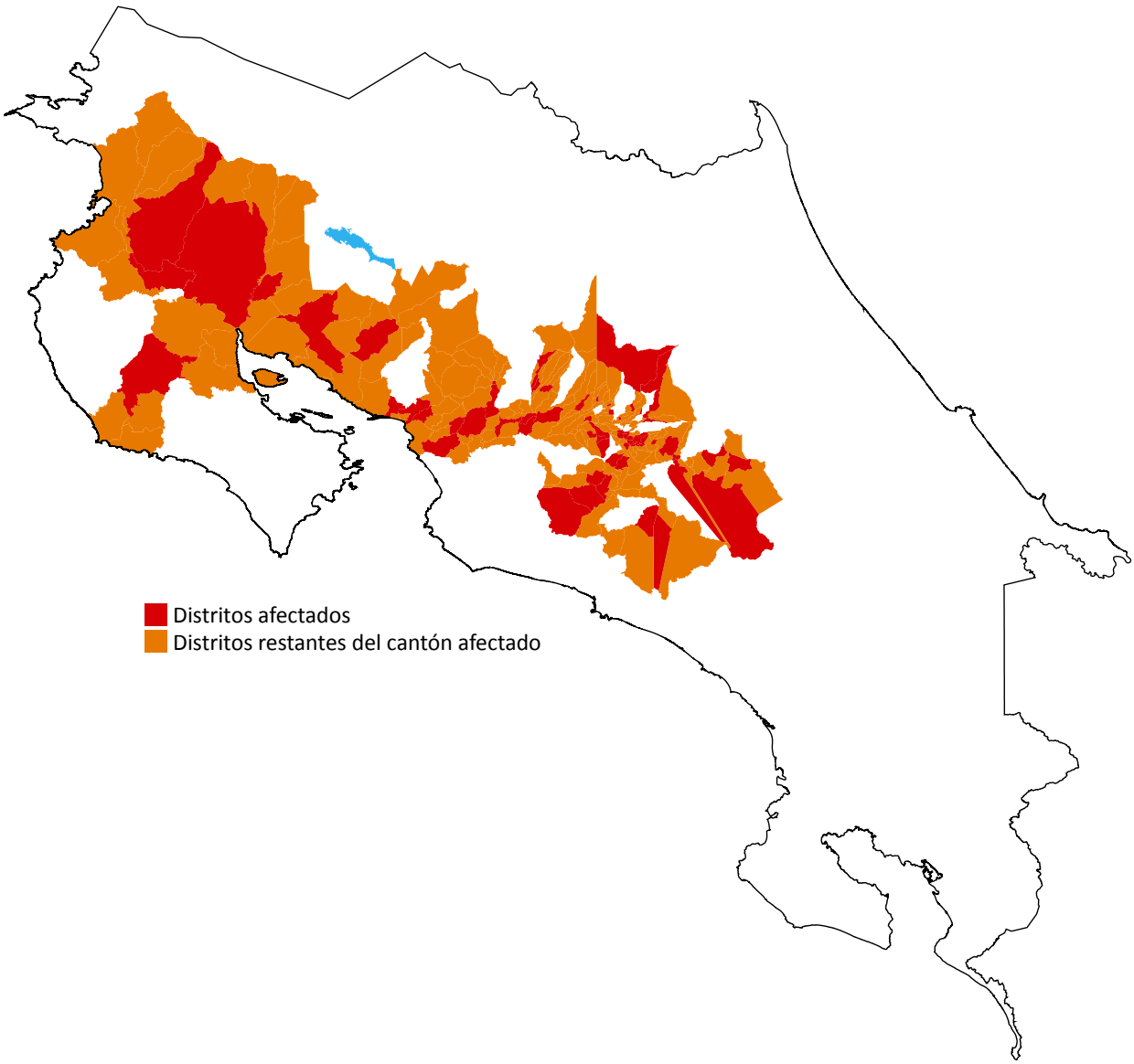


Figura 15. Distribución espacial de los distritos afectados por la estación lluviosa de 1886, en Costa Rica.
Fuente: Elaboración propia con datos de IMN (2019) y Granados (2020).

y Abangares, se dieron esas mismas fiebres en agosto y septiembre.

En Nicoya cerraron las escuelas como medida preventiva para impedir el contagio, empero, en setiembre los enfermos se incrementaron[42]. A noviembre, las fiebres intermitentes tenían afectada a casi toda la población nicoyana y en palabras del Sr. Abel Santos, médico enviado por la Secretaría de Policía para atender el brote de fiebre "*rara era la casa donde no había dos o tres individuos experimentando los perniciosos efectos de la infección palúdica*". La causa de dicho brote, obedeció al desarrollo de hongos microscópicos que se desarrollan en condiciones de excesiva humedad, a causa de la abundancia de lluvias que se presentaron desde setiembre, la poca permeabilidad del suelo para absorber tanta agua y evitar el estancamiento de la misma, aunado a las malas condiciones higiénicas de la

población. Adicional a ello, la descomposición de material vegetal y la gran cantidad de "*destritus*"[43] arrastrados a las fuentes de agua potable, incidieron en la propagación de las fiebres palúdicas. La epidemia, aunque no se consideró de gravedad, si generó fallecimientos a causa del limitado acceso a los medicamentos por parte de las clases más pobres de la sociedad nicoyana, por lo costosos que eran. La situación se remedió con los medicamentos enviados por el Gobierno[44].

3.4.4 Sociedad, economía y política

La vida política, económica y social, se vio afectada con la interrupción de las actividades programadas o cotidianas. El 8% de las consecuencias de las lluvias señalan la suspensión de alguna actividad, ya fueran actividades cotidianas, reuniones, transporte de mercancías o paralización de obras públicas.

La actividad escolar se afectó en algunos lugares, por la interrupción en los caminos y por la destrucción de puentes. En Aserrí, a causa del temporal de octubre, el jefe político ordenó: "*los niños que habitan fuera del trazado de los puentes, no vengan a la escuela, para no tener desgracias que lamentar*"[45], esto ante la desaparición de algunos puentes sobre las quebradas y el riesgo que significaba el cruzarlas.

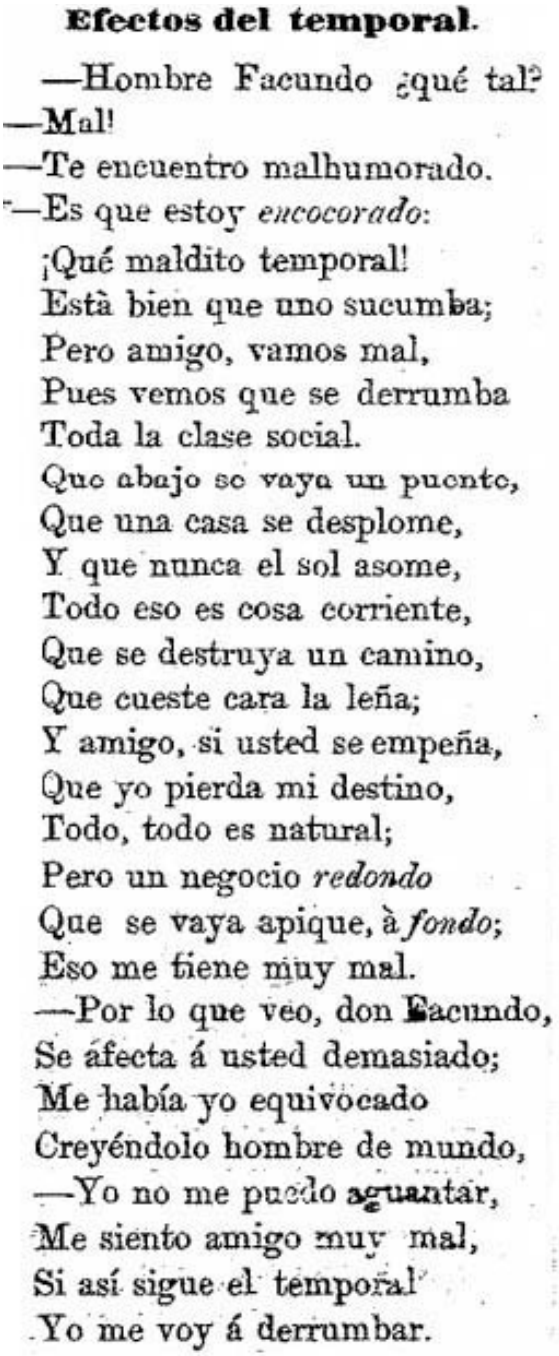
El transporte de mercancías se vio paralizado por el daño u obstrucción de los caminos. Algunos transportistas tuvieron que realizar trasbordos de mercadería. La población fue perjudicada por la especulación de precios, como el de la leña, que en la primera semana de noviembre se cotizaba en 6,50 pesos la carretada[46], y según los diarios de la época, demasiado cara[47]. A principios de diciembre había mercaderías aisladas en Carrillo y Limón, precisamente por los daños causados en la línea férrea entre Carrillo y Limón, y la carretera nacional San José a Carrillo, por el "mal tiempo".

El sector cafetalero esperaba algunos perjuicios en la cosecha de ese año, debido a la caída del grano en algunos cafetales, sin embargo, a pesar del fuerte invierno, la cosecha de 1886 se reportaba a principios de diciembre como buena y el precio de la fanega[48] de café fruta fluctuaba en el mercado entre 13 y 15 pesos[49]. Para otros productos la situación no fue tan buena; la exportación de banano se detuvo por los trastornos sufridos en la línea férrea, el caucho no tuvo movimiento comercial en la segunda quincena de noviembre, las ventas de cuero de res bajaron en las plazas y hubo un incremento en el precio, vendiéndose a principios de diciembre entre 16 y 18 pesos el quintal[50].

En el periódico *La Chirimia*, el contexto del temporal se prestó para hacer chota sarcástica ante ciertos negocios políticos no muy claros, incluso por la renuncia de varios ministros, como se puede leer en la figura 16. En la misma copla, se deja de manifiesto, que las afectaciones eran una cuestión ordinaria en la época de lluvias, no excluyendo por ello, las consecuencias económicas y sociales que generaban.

3.5. *El recuento de los daños*

La abundante lluvia de 1886, ocasionó daños documentados en seis de las siete provincias del país. De Limón, los pocos datos disponibles son imprecisos y corresponden a octubre y noviembre, muy posiblemente por la conjunción de dos factores: el primero que las lluvias se dieron fuertemente en la vertiente del Pacífico por el efecto de La Niña, fenómeno que incrementa las lluvias en dicha vertiente y vuelve menos lluviosa la vertiente Atlántica, y segundo, ante la posible disminución de lluvias en el Caribe costarricense para 1886, la poca población no sufrió afectación que generara reportes. A continuación se describen los principales daños para las provincias afectadas.



Efectos del temporal.

—Hombre Facundo ¿qué tal?
—Mal!
—Te encuentro malhumorado.
—Es que estoy *encocorado*:
¡Qué maldito temporal!
Está bien que uno sucumba;
Pero amigo, vamos mal,
Pues vemos que se derrumba
Toda la clase social.
Que abajo se vaya un puente,
Que una casa se desplome,
Y que nunca el sol asome,
Todo eso es cosa corriente,
Que se destruya un camino,
Que cueste cara la leña;
Y amigo, si usted se empeña,
Que yo pierda mi destino,
Todo, todo es natural;
Pero un negocio *redondo*
Que se vaya apique, à *fondo*;
Eso me tiene muy mal.
—Por lo que veo, don Facundo,
Se afecta á usted demasiado;
Me había yo equivocado
Creyéndolo hombre de mundo,
—Yo no me puedo aguantar,
Me siento amigo muy mal,
Si así sigue el temporal
Yo me voy á derrumbar.

Figura 16. Manifestación literaria de la relación temporal y sociedad. Fuente: *La Chirimia* (1886).

3.5.1 La afectación en San José

En la provincia de San José se vieron afectados los distritos de Cangrejal, Sabanillas, Aserrí, Vuelta de Jorco, Curridabat, Santa María, Escazú, San José (casco central), Santa Ana, San Marcos y Dulce Nombre de Jesús. La ciudad de San José con el 36% de la afectación documentada, el pueblo de Carrillo con el 26% y Aserrí con el 12%.

Los fuertes aguaceros del siete u ocho de setiembre, provocaron que en San José dos casas de no muy buena construcción colapsaran dejando sin vivienda a sus ocupantes. En octubre, uno de los impactos más considerables fue un derrumbe de 6.000 metros cúbicos sobre el río María Aguilar, al lado de la estación del tren llamada Estación de Sánchez[51] (hoy en desuso, ubicada al sur de Granadilla, Curridabat, a unos 100 metros al norte del actual paso de la línea férrea entre San José y Cartago, sobre el mismo río). El deslizamiento destruyó la vía férrea, que en ese entonces pasaba por ahí, dejando los rieles en el aire y mandando los durmientes al río. El tramo afectado fue de 60 metros de longitud y dejó imposibilitado el tránsito del tren entre San José y Cartago, por 10 días. De acuerdo con el informe enviado al Secretario de Estado por parte del Sr. Manuel V. Dengo Bertora, quien fungía como superintendente de la División Central del ferrocarril entre Cartago y Alajuela, la causa del deslizamiento fue la saturación del suelo de las tierras altas al lado norte del cauce del río, como consecuencia de las fuertes lluvias.

En el centro de la capital, el temporal dejó edificios públicos y casas de habitación afectadas, todo corroborado en una inspección realizada el siete de octubre por el cuerpo de policía, dada la magnitud de las lluvias (ver cuadro 6)[52].

El cantón de Aserrí, que en ese entonces incluía lo que hoy es el cantón de Acosta, sufrió derrumbes que destruyeron casas, obstruyeron caminos y dañaron cultivos de maíz y potreros. Hubo puentes pequeños destruidos por las crecidas de los riachuelos, las quebradas y cuatro puentes que se los llevó el río Grande de Candelaria. El camino desde Catedral hasta Aserrí se reportó destruido en un tramo de tres kilómetros y en Jorco se afectó la

Cuadro 6. Lista de los edificios afectados por el riguroso temporal de 1886 en San José según inspección realizada por la policía*

Edificio afectado	Calle de ubicación	Nombre de calle actual**
El Cuartel del Policía	Calle de Carrillo	Calle no identificada
Casa de don Jacinto Conejo Chávez	Calle de Catedral	Avenida 4 (de calle central al este)
Casa número 39	Calle de Chapuí	Avenida 6 (de calle central al este)
Casa número 1	Calle de Chapuí	Avenida 6 (de calle central al este)
Casa en frente a la número 1	Calle de Chapuí	Avenida 6 (de calle central al este)
Casa esquinera	Calle de Chapuí y del Laberinto	Intersección entre avenida 6 y calle 1
Casa de don José Alvarado	Calle de la Fábrica	Calle no identificada
Casa de doña Froilana C. de Carrillo	Calle de la Merced	Calle 4 (de avenida central al norte)
Casa de Mariana Morúa	Calle de la Paz	Avenida 8 (de calle central al oeste)
Casa de don Felipe Palma	Calle de la Uruca	Calle 8 (de avenida central al norte)
Pared de una casa en sucesión de Juan R. Mata	Calle de Velarde	Avenida 10 (de calle central al este)
Casa de Silvestre Solís	Calle de Velarde	Avenida 10 (de calle central al este)
Casa de don Manuel Soto	Calle del Comercio	Avenida central (de calle central al este)
Casa cochera de José Feo (cabildo viejo)	Calle del Cuño	Avenida 1 (de calle central al oeste)
Casa del hotel de José Apao	Calle del Cuño	Avenida 1 (de calle central al oeste)
Casa nueva de Mr. Chase	Calle del Laberinto	Calle 1 (de avenida central al sur)
Propiedad de los Srs. Tinoco	Calle del Teatro	Calle 6 (de avenida central al sur)
Casa de doña Alma Golcher	Plaza del Mesón	Calle 8 (de avenida central al sur)

* Fuente: *La República* (8 de octubre de 1886). **La relación del nombre nombre de la calle con la numeración por avenida actual, corresponde a la identificación indicada en un Plano de San José de 1906 tomado de https://www.sinabi.go.cr/.

agricultura. El jefe político de la localidad presumía que los derrumbes habían generado pérdidas humanas; al 12 de octubre no lo confirmaba, pero si reportaba la pérdida de reses y necesidades a remediar en los vecinos. También, el río Grande destruyó cuatro puentes de la Villa[53].

En la Zona de los Santos también hubo afectación: crecida de ríos, puentes destruidos, derrumbes, en su mayoría entre los días cuatro y cinco de octubre, considerables deslizamientos en los caminos de la zona y pérdidas en la agricultura y la ganadería[54].

Los detalles referentes a la afectación en la carretera nacional a Carrillo y del poblado como tal, se presentan en el apartado *3.5.7. Caribe Norte.* Esto obedece, al hecho de que no hay certeza para ubicar en una determinada provincia muchos de los lugares mencionados y las incidencias relacionadas al río Sucio al ser este límite entre provincias, pero sí para identificarlos como lugares pertenecientes a la región climática Caribe Norte. Territorialmente, parte del trayecto de la carretera a Carrillo y el pueblo se habrían ubicado en el actual distrito de Dulce Nombre de Jesús de Vásquez de Coronado, de la provincia de San José.

3.5.2 Los daños en Alajuela

En la provincia de Alajuela fueron afectados los distritos de Alajuela, Atenas, Grecia, Jesús, Jesús María, San Mateo, San Rafael, San Ramón, Concepción, La Ceiba, La Garita y Sarchí. La afectación porcentual por distrito fue entre 5 a 9% del total de incidencias para la provincia.

El Sr. Maurilio Soto, gobernador de la ciudad, señaló que el temporal inició en Alajuela el cuatro de octubre, generando al día seis, algunos daños en el sector residencial[55], tales como dos casas

destruidas y porciones de tapias derrumbadas, por la intensidad de la lluvia.

Además, el impacto en los caminos[56] fue principalmente por deslizamientos al colapsar las laderas por la cantidad de agua caída. En la carretera nacional, entre San Mateo y Esparza, se dieron cuatro derrumbes en el distrito de Jesús María y en La Garita, y el puente sobre el río Alajuela fue destruido por una crecida.

En Atenas, las fuertes lluvias dañaron el puente de la calle que conducía al cementerio de la localidad y en la región del Aguacate, se dieron cinco deslizamientos en la cuesta del río Grande, uno de ellos de 125 metros. La crecida del mismo río generó temor en los vecinos de la zona. El ayudante del Inspector General de Obras Públicas, el Sr. Jesús Jiménez Soto, informó el día ocho de octubre que con gran esfuerzo se logró dar paso a bestias y a carretas vacías, evidenciando que quitar los derrumbes iba a demorar varios días. En la localidad de Boca del Monte, la quebrada Cuajiniquil inhabilitó el uso del puente al destruir uno de los bastiones del mismo[57].

En Orotina, a la altura de Machuca, un derrumbe de 40 metros de longitud en la noche del nueve de octubre obstruyó el camino[58]. Mientras que en San Ramón hubo daños en un puente camino a Potrerillos. En el camino de San Rafael a Palmares, hubo un derrumbe de 100 metros de longitud que obstruyó la vía y un puente pequeño se hundió. En Sarchí, también se reportaron graves daños a puentes. En Grecia, luego de tres días seguidos de lluvia que iniciaron el cuatro de octubre, se declararon los caminos intransitables para carretas y los ríos crecidos pusieron en riesgo algunas casas[59].

3.5.3 Los daños en Cartago

En la provincia de Cartago, los distritos afectados fueron: Cartago (casco central con el 46,47% de las incidencias), San Francisco, San Nicolás, Cot, Tres Ríos, Paraíso, Orosi, Santiago y Tucurrique.

La ciudad de Cartago y poblaciones aledañas, fueron de las más afectas por las precipitaciones que iniciaron el cuatro de octubre. Un telegrama del día cinco[60], informaba al Ministro de Gobernación que la ciudad había estado por 20 horas consecutivas bajo el abrazo de una torrencial lluvia, generándose con ello diversos daños. La descripción invita a pensar en la cantidad de lluvia precipitada en un solo día.

La infraestructura residencial se vio impactada, algunas tapias y paredes se cayeron, casas ubicadas cerca al margen de los ríos se inundaron, falsearon o hundieron y otras desaparecieron por la fuerza de la crecida de los ríos.

Los efectos en la infraestructura vial se hicieron presentes, varios puentes se afectaron o desaparecieron producto del repentino aumento en el caudal de los ríos, como el puente en Hervidero que fue arrastrado por el río Aguacaliente. Las crecidas de los ríos también destruyeron los puentes sobre los ríos, Fajardo, Orosi y Navarro; y al puente sobre el río Reventado en Taras, se le falseó uno de los bastiones[61]. La población de Cot quedó aislada, por un derrumbe que obstruyó el camino que lo comunicaba con San Rafael[62].

3.5.4 Los daños en Heredia

En la ciudad de Heredia, el distrito de mismo nombre (casco central) registró el 40% de los daños y Barva el 25%. Los otros distritos afectados fueron: San Antonio, Varablanca, San Isidro, Santa Bárbara, Santo Domingo y Paracito.

De acuerdo con el gobernador de la ciudad, el Sr. Juan J. Flores, el temporal en Heredia inició el tres de octubre[63], igual de riguroso que en las otras provincias por los daños habidos. A tres días

de iniciado el evento, en Heredia se reportaban inundaciones en varios puntos de la ciudad por las "extraordinarias lluvias". Para el ocho de octubre, el temporal en Heredia se reportaba con la misma fuerza del inicio.

La infraestructura residencial también se vio afectada, con varias tapias y parte de una casa derrumbadas. Los caminos, luego de seis días de lluvias continuas, se diagnosticaron como intransitables y las avenidas de los ríos (cabezas de agua) destruyeron varios puentes[64]. Al cuatro de diciembre de 1886, se habían reparado en esta provincia 20.255 metros de caminos afectados por el temporal, empleando para ello 865 hombres y 134 yuntas de bueyes[65].

La población herediana no dejó de verse afectada en sus quehaceres sociales y económicos. Los trabajos urbanos se paralizaron a causa de las intensas lluvias y en el área rural se suspendieron las labores agrícolas, así como las visitas programadas que tenían algunos funcionarios religiosos. Los servicios públicos también fueron impactados, siendo la más afectada la cañería de agua potable por las "grandes avenidas de agua"[66].

En la localidad de Barva se derrumbaron dos casas de habitación y la casa municipal del cantón (la municipalidad) se vio seriamente afectada. Una crecida del río Virilla destruyó en Santo Domingo un bastión de un puente, cercano a la población de San Jerónimo (Moravia) y en San Antonio (Belén) dañó muy seriamente el puente de mulas, en la vía que los comunicaba con Santa Ana[67].

En Sarapiquí, distrito que se ubica en la región climática denominada Zona Norte, el siete de octubre se produjo un gran derrumbe de rocas en el puente de la vía férrea sobre el río Sucio, con pesos de más de una tonelada, que interrumpiría el tráfico de mercancías por tres días[68]. Para quitar las grandes piedras y aterros se recurrió al uso de dinamita.

3.5.5 Los daños en Guanacaste

En la provincia de Guanacaste, las incidencias se presentaron en Liberia (35%), Bebedero, Filadelfia, Nicoya y Abangares.

Los vecinos de Bebedero de Cañas, abandonaron sus hogares y se refugiaron en las lomas cercanas, a causa de las crecidas del río de la localidad. La casa donde se ubicaba el telégrafo se inundó hasta medio metro, lo que obligó a suspender el servicio, restableciéndose hasta el día 13 de octubre cuando las aguas de los ríos regresaron a su cauce[69]. También hubo afectación en la comunicación por telégrafo debido a daños ocurridos en otras localidades, como se verá en la provincia de Puntarenas. En esta provincia se presentaron fiebres palúdicas en Abangares y Nicoya.

La población del cantón de Carrillo fue una de las grandes afectadas en Guanacaste. El Sr. Buenaventura Villegas reportó que el temporal terminó hacia el 17 de noviembre y que *"el espectáculo, que el río nos ha dejado es digno de verse".* Según Villegas, el río se desplazó hasta 150 metros en algunas partes y los daños fueron muchos y de consideración[70].

De acuerdo al reanálisis de la figura 10, Nicoya fue la posible región con mayor precipitación en 1886, por la influencia de la baja presión de inicios de octubre, sin embargo, para finales de octubre y mediados de noviembre, debieron de haberse dado fenómenos similares para que los ríos de la zona se desbordaran e inundaran las localidades indicadas en los reportes.

3.5.6 Los daños en Puntarenas

En la provincia de Puntarenas, el 50% de la afectación se presentó en los distritos de Espíritu Santo, Barranca, Guacimal y Puntarenas.

Un telegrama enviado a la Cartera de Fomento por el Ing. Luis Matamoros, Superintendente del

Ferrocarril, cuenta del desbordamiento del río Barranca el seis de octubre, dañando el puente ferroviario sobre el mismo, por lo que urgía a "empezar la reparación tan pronto como el río de lugar"[71]. A causa del temporal, en Guacimal se cayeron dos postes del telégrafo, con la inevitable consecuencia de la suspensión del servicio entre Esparza y Liberia por algunos días, el mismo fue restablecido al tercer día[72].

El no encontrar mayor cantidad de reportes de otros cantones puntarenenses, hace pensar que el temporal se presentó con mayor fuerza en la Región Central del país. La causa del desbordamiento del río Barranca, podría obedecer a la acumulación de agua proveniente de la cuenca media del río, más que por la precipitación ocurrida en la región de Barranca. La escasa cantidad de datos puede también estar relacionada, al igual que en Limón, a la poca población de la provincia para ese entonces. Se debe considerar también, que el Pacífico Sur estaba prácticamente deshabitado por la población mestiza y que la población indígena habitante de la zona, no generó información de afectaciones.

3.5.7 Caribe Norte y Limón

Mucha de la documentación de esta región es sobre las incidencias en torno río Sucio, debido a la imprecisión para determinar la posible ubicación territorial de los lugares afectados, se comenta en esta sección sobre el Caribe Norte, región a la que si está clara su pertenencia. El peso de la afectación fue sobre la línea férrea del Caribe y la carretera nacional a Carrillo; ambas vías de comunicación sufrieron deslaves, derrumbes y destrucción de puentes.

En la provincia de Limón, los EHE documentados son de octubre y noviembre. El ocho de octubre, el Sr. Wills, representante de Minor C. Keith, reportaba: "Ha seguido el mal tiempo desde San José hasta Limón"[73], lo que confirma que el temporal que inicio el cuatro de octubre, también afectó el Caribe. En la región, todos los ríos sobre los cuales pasaba la línea férrea se crecieron, en especial los ríos Reventazón, Pacuare y Matina. El río Toro Amarillo, aunque no se había llenado tanto, se estimaba en riesgo si seguía lloviendo[74].

En la carretera a Carrillo, importante ruta de comunicación en la década de 1880, entre San José y Carrillo (pueblo establecido cerca de la unión de los ríos Sucio y Hondura, abandonado hacia 1890 cuando se terminó el ferrocarril al Atlántico, y del cual, parte de su trayecto continuaba bordeando el río Sucio hasta llegar a lo que hoy es Santa Clara de Pococí)[75] se dieron derrumbes en octubre y noviembre, entre los que destacan el de Bajo de la Hondura, en Piedras Grandes, en el Recreo, en la junta de aguas del río Blanco y Sucio, Las Cuecas y quebrada de Martín. En Bajo la Hondura el río Hondura, afluente del río Sucio, se creció y salió de su cauce, lavando por completo el camino y destruyendo el muro de retención. El paso quedó habilitado solo para tránsito a caballo. El río Hondura se crecería nuevamente en noviembre y en esa ocasión destruyó otros dos puentes[76].

En el pueblo de Carrillo, el río Sucio se creció el día ocho[77] a consecuencia del temporal que se mantuvo en la zona hasta entrado el mes de noviembre, y erosionó la margen del río al lado de la Aduana; el agua se metió y mojó al menos 50 sacos de trigo, con su consecuente pérdida. La misma crecida destruyó por completo el puente de hierro del ferrocarril sobre el río Sucio y otro puente más pequeño. Algunas personas creían que solo la lluvia no podía haber generado la crecida y que era posible que entre los sitios Carcía y Cocora se encontrara algún gran depósito de agua, producto de algún tipo de presa, que pudo ocasionar la inundación[78]. Otros puentes afectados por las lluvias fueron: los puentes sobre Toro Amarillo, puentes de hierro sobre el Río General, río General Chiquito, Quebrada Gata, Caño Seco.

La preocupación por el estado de la carretera a Carrillo fue notoria en el sector mercantil del país, dada su importancia para la época:

> *"Notorios son en el país los estragos que, contra toda previsión humana, han hecho los temporales y los aluviones consiguientes en la carretera a Carrillo.*
>
> *El comercio y el pueblo entero tienen fijas sus miradas en aquella arteria de la savia de la República. Su inmediata reparación es el objetivo más vehemente de las aspiraciones que miran al progreso y al desarrollo mercantil de la nación"*[79].

La comunicación telegráfica con San José se interrumpió y la reparación se dificultó por la caída de varios puentes arrastrados por la crecida del río Hondura y Blanco, que pasaron por encima de los mismos "arrastrando árboles, troncos y rocas"[80]. El guarda del telégrafo tuvo que internarse en la montaña buscando camino para llegar al sitio del daño, pero infructuosamente, ya que la línea telegráfica, al igual que los puentes, habían desaparecido. Sobre los daños causados por dichas crecidas, el guarda del telégrafo y el Superintendente segundo de carretera le informaron a Minor C. Keith que "los estragos hechos por los ríos son casi que increíbles"[81].

3.6. Reparación de daños

La Dirección de Telegrafía, tuvo clara la importancia del servicio que brindaban y cómo el telégrafo desempeñaba un rol sumamente importante en las comunicaciones de la época. Los informes de las unidades de inspección evidencian las constantes reparaciones que realizaron durante ese año, para mantener el servicio activo. A principios de octubre, el Sr. F. Rob. Castro, como jerarca de la Dirección de Telégrafo, reportaba al Secretario de Estado, el Sr. Ricardo Jiménez, que "con motivo del riguroso invierno, la comunicación no está fácil, y a fin de evitar que haya interrupción he ordenado a los guardas mayor vigilancia". La medida del Sr. Castro tenía como fin identificar la causa de la interrupción de las comunicaciones, la magnitud del daño y el sitio exacto de la avería, para poder restaurar el servicio telegráfico lo antes posible.

La Dirección de Obras Públicas trabajó arduamente durante toda la época lluviosa en la reparación de carreteras, caminos y la vía férrea en la sección al Pacífico que estaba a cargo del Estado, ya que la del Atlántico aún estaba bajo la supervisión de las compañías de Minor C. Keith. Don Odilión Jiménez, inspector, así lo demuestra para la sección que tenía a cargo, Puntarenas-Esparza:

> *"Las continuas lluvias que desde mayo se declararon han causado daños que sin una pronta y activa reparación, el ferrocarril al Pacífico no pudiera marchar ya.*
>
> *Dos cuadrillas compuestas de 10 a 12 peones cada una; la primera de Puntarenas a Barranca y la segunda de allí a Esparta, se ocupan diariamente, y si el tiempo no mejora no se podrá reducir todavía este numero"*[82].

Además del deterioro habitual por el tránsito, la carretera nacional Cartago-Puntarenas se vio afectada por los lodazales, los huecos y los derrumbes constantes, generados como consecuencia del exceso de lluvias. Solo en los primeros meses de la época lluviosa, de mayo a julio, la carretera nacional se afectó por aterros y derrumbes en el trayecto del Monte del Aguacate, que causaron bastante trabajo y perjudicaron notablemente el piso de la carretera[83].

La composición y el mantenimiento general de la carretera nacional durante el año de 1886, superaría los 36.000 pesos (ver cuadro 7). Solo en los meses de mayo a julio, la Inspección de Obras Públicas reportó en reparaciones, entre las que incluía rellenos de hoyos, retiro de barro,

colocación de piedra para facilitar el paso y reparación de puentes, una inversión de 10.145,93 pesos, siendo el mes de julio el de mayor coste.

La inclemencia del tiempo y los daños por la cantidad de lluvia, generarían una mayor inversión a lo largo de los siguientes meses. Después de la fuerte afectación del temporal de octubre, los costos en las reparaciones se incrementaron. De octubre a diciembre se invirtieron 16.713,60 pesos de la época en reparaciones, el 46% del total.

Dicha ruta se dividía en cinco secciones para su mantenimiento y cada sección en cinco tramos, atendidos cada uno por una cuadrilla diferente; en total eran 25 cuadrillas trabajando constantemente, a puro brazo y herramienta. Las cuadrillas estaban conformadas por entre ocho a 15 personas, en las épocas fuertes de invierno.

La función de la sección de Inspección fue fundamental para ello. En los derrumbes recurrentes a lo largo del trayecto del Aguacate,

Cuadro 7. Costos en mantenimiento de la carretera nacional Cartago-Puntarenas para 1886

Mes	Gastos (pesos)
Enero	414,33
Febrero	112,75
Marzo	390,40
Abril	N.D.
Mayo	2 107,83
Junio	3 803,20
Julio	4 234,90
Agosto	3 834,00
Septiembre	4 684,65
Octubre	4 213,25
Noviembre	5 433,00
Diciembre	7 067,35
Total en pesos	**36 295,66**

Fuente: Balance de operaciones de la Inspección de Obras Públicas, Cartera de Fomento, publicados en *La Gaceta* de febrero de 1886 a enero de 1887.

los "ayudantes de inspección" constantemente reportaron a don Odilión Jiménez, Inspector de Obras Públicas, el estado de los deslizamientos y de la cantidad de cuadrillas que disponían para la reparación de caminos, al menos para habilitar el paso de caballería, como se desprende del siguiente telegrama del nueve de octubre:

> *"Anoche derrumbamiento, obstruyendo el camino a dos y medio kilómetros del puente de Machuca: mide 40 metros de longitud, dos cuadrillas facilitando paso de herradura"*[84].

Para el día 12 de octubre, la Dirección trabajaba diligentemente para reparar los daños de la carretera a Cartago, en los tramos entre San Pedro y Curridabat, y entre Curridabat y el barrio de Herrán, perteneciente al distrito de San Juan de La Unión[85].

Para la reparación de caminos, la Dirección de Obras Públicas, tuvo el apoyo constantemente de la población, contratada algunas veces bajo la modalidad de jornal para conformar las cuadrillas y en otras como trabajo voluntario de los habitantes de la zona. Un ejemplo de ello son las reparaciones en Aserrí, informadas por el Jefe Político, Sr. Hilarión Aguirre:

> *"El lunes próximo pasado me fui con ochenta hombres a la composición de la cuesta de Candelaria; se hicieron algunos nuevos trazos y se desaguó y amplió en lo posible, pero me faltó la gente del distrito de San Rafael y algunos del San Juan de Dios, se entiende interesados: ha habido en estos días unos aterramientos, y está casi intransitable; espero, pues, que su autoridad expida de nuevo las órdenes conducentes, siquiera sea para que las personas que faltaron repongan su día de trabajo, que en esta jurisdicción hay otras que voluntariamente les van a ayudar"*[86].

En otros lugares, los vecinos simplemente se movilizaron para buscar como habilitar los pasos aterrados o a mover restos de los puentes, como ocurrió en Santa María (de Dota):

> *"En el primero* [se refiere al puente sobre el río Parrita] *quedó una viga la cual fue amarrada quedando así útil para pasar a pie; y otras dos, con mucho esfuerzo de los vecinos, las emplayaron fuera del río a distancia del lugar"*[87].

Las reparaciones se llevaron varios días, incluso entrado el mes de noviembre. Nuevamente en Aserrí y Acosta, la participación de la ciudadanía fue determinante:

> *"Todos los vecinos de esta jurisdicción están trabajando componiendo los caminos públicos, en la proporción que determina la ley, sin excepciones ni favoritismos de ningún género; y según informa el Juez de Paz, están transitables la mayor parte de los caminos"*[88].

Otro ejemplo de la cooperación de los vecinos de las comunidades en la reparación permanente o provisional de los caminos, fue la gestionada por la gobernación de Cartago:

> *"...a iniciativa de esta Gobernación, los vecinos del barrio San Francisco de esta ciudad han costeado y concluido un puente de vigas sobre el río "Agua Caliente", quedando así remediada una necesidad apremiante, sin perjuicio de llevar a cabo el proyecto de un puente formal..."*[89]

En Aserrí, como en otros muchos lugares, una vez pasado el temporal de octubre, lo prioritario fue rehabilitar los caminos, la reactivación de la economía era necesaria para evitar mayores dificultades en la subsistencia de los habitantes de las regiones aisladas, tal como lo manifestó el Sr. Hilarión Aguirre, Jefe Político de Aserrí:

> *"Estoy concluyendo la composición de la cuesta la Candelaria, asunto de suma necesidad y utilidad general, porque si no establezco ese tráfico, no vienen los productos de diez distritos y Usted puede comprender el perjuicio que resultaría a las masas del centro, de este incidente"*[90].

Carretera a Carrillo.

En $ 9,725-00 calcula el señor Director de Obras Públicas los gastos que habrá que hacer para colocar en buen estado la carretera.

ATERROS.

En las primeras vueltas de la Hondura	$	300
En el bajo de la Laguna	„	50
En las Piedras Grandes	„	150
Entre la Laguna y la Boca del Infierno	„	80
Mas tres aterros pequeños	„	25
Aterro grande en el Recreo	„	400
Id. dos pequeños	„	20
Id. frente á Peralta (80 m.)	„	350
Id. „ Cuascua	„	150
Id. la Junta de Blanco y Sucio	„	1,000

DESRUMBAMIENTOS.

Las Cuevas	$	1,700
Quebrada de Martín	„	550
Rio Blanco	„	150
Relleno de Macklein	„	200
„ „ „ 2 ?	„	500
Playas de Carrillo	„	1,000

PUENTES.

En la Laguna el primero de madera	$	100
„ „ „ „ segundo (campto.)	„	300
„ „ „ „ tercero (id.)	„	500
Puente largo del Coronel	„	800
Id. caño de Rio Sucio	„	800
Id. Aduana	„	600

Figura 16. Estimación de costos de las reparaciones en la carretera a Carrillo. Fuente: *La República* (1886).

Por su parte, la oficina de telégrafo comunicó que la comunicación con Nicaragua se había logrado restablecer el día 12 de octubre, luego de cinco días sin servicio, debido a que las crecidas de los ríos no habían permitido llegar a La Cruz a reparar los daños de la zona[91].

El servicio del tren, luego del derrumbe en Curridabat, quedó habilitado el día 14 de octubre pero por razones de seguridad, con trasbordo durante cuatro días hasta que el terreno no se secó y solidificó nuevamente. Parte de las dificultades enfrentadas para la reparación, fue que el uso de la dinamita para agilar la remoción del derrumbe, no fue efectivo debido a la suavidad del terreno, y el trabajo lo realizaron durante una semana usando solo herramientas[92].

Cuadro 8. Costos de reparación de algunas de las afectaciones en las vías de comunicación por el extremo lluvioso de 1886

Cantones	Afectación	Concepto	Costo (pesos)
Barba	4.300 metros de caminos	182 peones, 44 yuntas de bueyes y 62 pesos en comisionados	175
Barba	3.000 metros de caminos	73 hombres, 17 yuntas de bueyes	45
Desamparados	Varios caminos del cantón	102 jornales	51
Escazú	Camino de los Anonos a Escazú	62 jornales y 22 boyeros	85
Escazú	Puente de Mulas sobre río Virilla	Varios honorarios de profesionales y jornales	375
Heredia	4.000 metros de camino	290 jornales, 35 boyeros y 57 pesos en comisionados	220
Heredia	13.000 metros de camino	506 hombres, 67 yuntas y 79 pesos, una semana	366
Heredia	Varios caminos del cantón	658 peones, 99 yuntas de bueyes y 50 pesos en comisionados	429
Heredia	1.000 metros de caminos	75 hombres, 10 yuntas y 23 pesos en comisionados	66
La Unión	Varios caminos del cantón	127 peones y 25 yuntas de bueyes	76
La Unión	3.900 metros de camino	124 peones y 29 yuntas de bueyes	77
San Rafael	100 metros de camino	16 peones y 9 yuntas	13
San Rafael	500 metros de camino	30 hombres y 7 yuntas de bueyes	19
Santa Ana - San Antonio (Belén)	Destrucción de cortinas y rellenos del puente de mulas	Materiales	800
Santa Bárbara	6.155 metros de caminos	363 jornales y 63 yuntas de bueyes	213
Santa Bárbara	2.300 metros de caminos	161 hombres, 14 yuntas	88
Santo Domingo	200 metros de caminos	89 peones y 13 yuntas de bueyes	51
Varios	Carretera Nacional Puntarenas-Cartago	Reparaciones a lo largo del año	36.296
Vásquez de Coronado - Heredia (Varablanca)	Carretera nacional a Carrillo	Múltiples	9.745
TOTAL			**49.190**

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de los periódicos *La Gaceta, Diario Costa Rica, La República, Otro Diario* y *El Comercio* (1886).

La carretera nacional en el trayecto a Cartago fue reparada, no sin antes tener que lidiar con algunas dificultades. La Dirección de Obras Públicas enfrentó la escasez de obreros (peones y carreteros), para el trabajo y la dificultad de los mandadores de obra para obtener piedra y arenón de los ríos, por impedimento de los Jefes Políticos y la Policía de los lugares por donde pasaba la carretera, aduciendo estos, que la carretera era Nacional y no vecinal, por lo que los materiales debían de llegar de otros lados. Dicha situación alargó el tiempo de las reparaciones y se requirió de la intervención de las autoridades políticas, para solventar los inconvenientes referidos[93].

La carretera nacional a Carrillo sufrió muchos derrumbes y destrucción de puentes, durante septiembre, octubre y noviembre. Los costos de la reparación superaron los 9.000 pesos[94] (ver figura 16). Los arreglos reincidentes duraron algunas semanas. A causa de los daños sufridos en esa ruta por las crecidas de los ríos en noviembre, la vía fue habilitada hasta el 23 de diciembre para paso de carretas de San José a la aduana de Carrillo, sin embargo, a esa fecha, el paso entre Carrillo y Limón por la vía férrea aún no era posible a falta de concluir las reparaciones en algunos puentes[95].

Se recopilaron algunos gastos menores en mano de obra por la reparación de algunos caminos, pero no de materiales de obras grandes como puentes, valor de casas destruidas y pérdidas en agricultura, entre otros. En diciembre, se reportaba que en Heredia habían reparado más de 20.000 metros de caminos dañados por los temporales, empleando para ello 865 hombres y 184 yuntas, mientras que en Alajuela se habían reparado 10.120 metros, con mano de obra de 297 peones[96]. Las reparaciones indicadas en el cuadro 8, corresponden solo a caminos y ascienden a más de 49.000 pesos. El mismo cuadro pone en perspectiva la cantidad de personas empleadas y la mecánica utilizada para la composición de los caminos.

4. CONCLUSIONES

La temporada lluviosa se sintió con fuerza en septiembre y octubre de 1886, siendo el temporal que inició el cuatro de octubre el que afectó considerablemente al país. La causa de ese temporal fue la influencia de una baja presión que se desarrolló en el Caribe, que inició al sur de República Dominicana y se movió hacia el oeste llegando a pasar cerca de la costa hondureña; luego de seis días, aproximadamente, se convirtió en huracán y tocó tierra en Estados Unidos.

Aunque el país y toda la región centroamericana estuvo en 1886 bajo los efectos de la fase fría de ENOS, La Niña, la cual causa precipitaciones anuales mayores al promedio histórico en la vertiente del Pacífico, la gran cantidad de lluvia que cayó durante el año y en particular en los meses de marzo, abril y noviembre, tuvieron que obedecer a la influencia conjunta de otros fenómenos meteorológicos, como la baja presión de inicios de octubre.

La intensidad del evento fue extrema y afectó considerablemente la economía del país, generando daños que no se han podido cuantificar pero que en moneda de la época se estima deben haber superado los 150.000 pesos. Solo en reparación de caminos se demostró que la inversión llegó a 49.000 pesos, pero aún faltan datos de gran cantidad de puentes de mulas, carreteros y ferroviarios destruidos, caminos vecinales dañados, casas destrozadas y las pérdidas en la agricultura que son inestimables.

El fuerte temporal, demostró en ese momento, la vulnerabilidad de la población ante eventos hidrometeorológicos extremos, situación que se ha mantenido a lo largo de la historia. Además, los deslizamientos, la crecida de ríos y las inundaciones han sido los incidentes más amenazantes y constantes.

La reacción social del país fue favorable, muchos ciudadanos acudieron voluntariamente a la reparación de los caminos o retiro de los derrumbes y, en otros casos, formaron parte de cuadrillas de la Dirección de Obras Públicas que recibieron un jornal. La población en su interés por rehabilitar los caminos, la disposición del Gobierno facultada por algunas leyes de la época para el pago de jornales orientados a las reparaciones en caso de emergencias y el interés solidario de algunos vecinos, fue la mezcla determinante para evitar el colapso de las principales rutas de tránsito.

La reacción de las autoridades de Gobierno fue inmediata, llamando a la población a trabajar en las reparaciones y cuando hubo resistencia, hicieron uso de las leyes vigentes para llamar la población a trabajar.

Los Jefes Políticos, los Jueces de Paz y los Agentes de Policía de las poblaciones, fueron determinantes para el conocimiento de la emergencia al ser quienes enviaron constantemente los informes de situación, reportando el estado del tiempo en sus regiones, las incidencias y los daños causados por las abundantes lluvias.

La eficiencia del telégrafo en la época, indudablemente facilitó el rápido conocimiento de las incidencias y afectaciones, permitiendo al Gobierno, con todos los telegramas recibidos en la Secretaría de Gobernación en el Despacho de Fomento, tener un claro panorama de lo ocurrido, y reaccionar rápidamente con los directores de las instituciones respectivas para atender, principalmente, la reparación de los caminos.

Finalmente, se recomienda indagar en otras interrogantes tales como ¿qué otros fenómenos meteorológicos pudieron incidir en la inusual cantidad de lluvia de 1886?, ¿qué pasó con el veranillo de julio?, ¿qué otro factor adicional a La Niña pudo haberse sumado para que este año fuera tan extraordinario? y ¿cuándo inició realmente el fenómeno de La Niña? La búsqueda de datos diarios de precipitación podría arrojar una línea de investigación, para determinar que otros fenómenos se presentaron en el país y en qué mes, si hubo picos en las precipitaciones o si la lluvia fue constante.

5. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento profundo al meteorólogo Luis Fernando Alvarado Gamboa, por la cooperación con el reanálisis, y al ingeniero agrónomo José Alberto Retana Barrantes, investigadores del Departamento de Desarrollo del Instituto Meteorológico Nacional. A ambos, gracias por los aportes y sugerencias brindadas al enfoque meteorológico de este artículo.

6. REFERENCIAS

Abarca, C.; Valverde, H. y Salas, E. (2009). *Forjadores de Costa Rica*. 1 ed. Editorial Forjadores. San José, Costa Rica.

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (s.f.). *NOAA Historical Hurricane Tracks*. Recuperado de: https://coast.noaa.gov/hurricanes/. NOAA, Estados Unidos.

Archivo Histórico Arquidiocesano Bernardo Augusto Thiel. (s.f.). *Consulta de diversos documentos*. AHABAT. San José, Costa Rica.

Archivo Nacional de Costa Rica. (s.f.). *Consulta de diversos fondos*. ANCR. San José, Costa Rica.

Biblioteca Nacional de Costa Rica (s.f). *Hemeroteca*. Consulta en línea.

Botey, A.M.; De la Cruz, V.; Rodríguez, E.; Rojas, F.; Aguilar, F.; Valverde, C.; Morales, M. y Fallas. M. (1997). *Historia de Costa Rica*. Tomo III. Editorial Eidos, San José, Costa Rica.

Calvo, JB. (1887). *Apuntamientos geográficos, estadísticos e históricos de la República de Costa Rica*. Imprenta Nacional, San José, Costa Rica.

Clare, P.; Goebel, A. y Rivero, F. (2014). *Historiografía de la historia ambiental en Costa Rica 1970-2010. La historiografía costarricense en la primera década del siglo XXI: tendencias, avances e innovaciones*. Editorial UCR. San José, Costa Rica. p. 297-315.

Dirección General de Estadística y Censos. (1927). *Censo Nacional de Población de Costa RIca 1927.* Oficina Nacional del Censo. San José, Costa Rica. Recuperado de: https://ccp.ucr.ac.cr/bvp/censos/1927/index.htm

Dirección General de Estadística y Censo. (1887). *Anuario estadístico de la República de Costa Rica 1886*. Tomo cuarto. Ministerio de Fomento, Sección estadística. Imprenta Nacional. San José, Costa Rica. Recuperado de: https://ccp.ucr.ac.cr/bvp/pdf/anuariocr/an1886/index.htm

Fernández, W. y Ramírez, P. (1991). El Niño, la Oscilación del Sur y sus efectos en Costa Rica: una revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 11, No1, p. 3-10.

Goebel, A. (2009). "Una lluvia de males: el régimen de precipitaciones en la Costa Rica del "progreso". Trayectoria, representaciones sociales e impacto socioeconómico (1860-1940)". *Revista de Historia*, (59-60), enero-diciembre 2009, 57-97.

Golcher, E. y Mora, C. (1994). *Nacionalismo, liberaismo e imagen nacional.* Cátedra de las Instituciones de Costa Rica, Escuela de Historia, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Granados, R. (2020). Eventos hidrometeorologicos extremos en Costa Rica en los siglos XVIII y XIX: Una aproximación a la reconstrucción histórica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, Volumen 19, No. 1. IMN, San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional. (2020). *Glosario meteorológico*. Departamento Información. IMN. San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional. (2020b). *Registro histórico de precipitaciones de San José*. Departamento Red Meteorológica y Procesamiento de Datos. IMN. San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional. (2019). *Base de Datos de Eventos Meteorológicos Extremos (EME)*. Departamento de Desarrollo y Unidad de Informática. IMN. San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional. (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. IMN. San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional. (s.f.). *Clima en Costa Rica. El clima y las regiones climáticas de Costa Rica.* IMN. Recuperado de: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/

Instituto Meteorológico Nacional. (s.f.). *¿Qué es el ENOS?.* IMN. Recuperado de: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/1-Que+es+el+ENOS.pdf/

Instituto Meteorológico Nacional. (s.f.). *Componentes del ENOS.* IMN. Recuperado de: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/2-Componentes+del+ENOS.pdf/

Instituto Meteorológico Nacional. (s.f.). *La Niña: fase fría del ENOS.* IMN. Recuperado de: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/6-LA_NI%C3%91A_FASE_FRIA_ENSO.pdf/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou,

M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press

Manso, P.; Stolz, W. y Fallas, J.C. (2005). El régimen de la precipitación en Costa Rica. *Ambientico*, No. 144. Escuela de Estudios Ambientales, Universidad Nacional. San José, Costa Rica. p. 7-8.

Mora, I. y Amador, J. (2000). El ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. Volúmen 7, No. 1, p. 27-39. IMN, San José, Costa Rica.

León, J. (2002). *Evolución del comercio exterior y del transporte marítimo de Costa Rica. 1821-1900*. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Obregón, C. (2000). *El proceso electoral y el Poder Ejecutivo en Costa Rica*. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Organización Meteorológica Mundial. (2014). *El Niño / Oscilación del Sur.* OMM-N°1145. OMM. Ginebra, Suiza.

Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas climatológicas.* OMM-N°1. Tiempo-Clima-Agua. OMM. Ginebra, Suiza.

Peraldo, G y Rojas, E. (1998). La deslizable historia del ferrocarril al Caribe de Costa Rica. *Anuario de Estudios Centroamericanos*. 24 (1-2), p. 97-128. San José, Costa Rica.

Pittier, H. (1890). *Anales del Instituto Físico-Geográfico Nacional. Tomo 3.* Secretaría de Instrucción Pública, Instituto Físico Geográfico Nacional. Imprenta Nacional, San José, Costa Rica.

Physical Sciences Laboratory. NOAA-CIRES-DOE. (s.f.). *Twentieth Century Reanalysis (20CR)* https://www.psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/

Reed, W.W. (1923). Climatological Data for Central América. *Monthly Weahter Review.* March 1923, p. 133-141.

Quesada, M. (2005). Odonimia josefina. *Revista de Artes y Letras*. Vol. 29. Págs. 185-198.

Retana, J.A. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Ambientales* 44. Págs. 5-16.

Retana, J.; Villalobos, R.; Alvarado, L; Sanabria, N.y Córdoba, J. (2014). *Seguridad alimentaria y el cambio climático en Costa Rica: Granos Básicos.* Instituto Meteorológico Nacional, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Ambiente y Energía. 96 p.

Salazar, O. (2002). *El Apogeo de la República Liberal en Costa Rica. 1870-1914*. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Santamaría, A. (1998). Canales, cafetales y banano: Historia del ferrocarril de servicio público en Centroamérica y Panamá. En: Sanz Fernández, J. *Guía historica de los ferrocarriles iberoamericanos (1837-1995).* Ministerio de Fomento, España. p. 249-288.

Vargas, C. (1994). *El Estado y la sociedad costarricense en la segunda parte del siglo XIX.* Cátedra de las Instituciones de Costa Rica, Escuela de Historia, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Wikipedia contributors. (2020). "1886 Atlantic hurricane season," *Wikipedia, The Free Encyclopedia.* Recuperado de: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=1886_Atlantic_hurricane_season&oldid=957551999

Wolter, K. & Timlin, M.S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology*, 31: 1074-1087. Royal Meteorogical Society in Wiley Online Library (http://wileyonlinelibrary.com/)

Zuta, S. (2001). El clima y su influencia en el desarrollo de los pueblos. *Hidráulica y termofluidos*. Año 2, (2). Universidad Mayor de San Marcos (UNMSM), Facultad de Ciencias Físicas. Lima, Perú.

7. NOTAS AL FINAL

1 Calvo, Joaquín Bernardo. *Apuntamientos geográficos, estadísticos....*

2 DGEC. *Censo Nacional de Población de Costa Rica 1927*.

3 Botey, Ana María y otros. *Historia de Costa Rica*. Tomo III.

4 Obregón Quesada, Clotilde. *El proceso electoral*... p. 194-196.

5 Poder Ejecutivo. Decreto No. 12. *La Gaceta*. 1886. 5 de octubre, p. 1.

6 La Gaceta, 15 de diciembre de 1886, p. 641.

7 La Gaceta, 1886, 11 de septiembre, p. 314.

8 Botey, Ana María y otros. *Historia de Costa Rica*. Tomo III, p. 40-50.

9 La República. 1886. 4 de noviembre, p. 2.

10 Botey, Ana María y otros. *Historia de Costa Rica*. Tomo III, p. 61.

11 "Exportación". *El Comercio. Semidiario de la mañana*. 1886. 18 de noviembre, p. 3.

12 La Gaceta. 1886, 26 de agosto, p. 246.

13 Abarca, Carlos y otros. *Forjadores de Costa Rica*, p. 82.

14 IMN. El clima y las regiones climáticas de Costa Rica....

15 AHABAT. Fondos antiguos, caja 356, tomo 1, folio 355. 11 de junio de 1886 y Diario de Costa Rica. 1886. 22 de junio, p. 2.^^

16 Wolter, K. & Timlin, M.S. "El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871..."

17 Retana, José Alberto y otros. *Seguridad alimentaria y el cambio climático en Costa Rica*.... p. 50.

18 Línea base de precipitaciones, 1961-1990. IMN, 2020

19 Mora y Amador. "El ENOS, el IOS y la corriente en chorro...", p. 35; y Wolter, K. & Timlin, M.S. "El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871..."

20 "Temporales". *El Comercio. Semidiario de la mañana*. 1886. 20 de noviembre, p. 4.

21 NOAA-CIRES-DOE Twentieth Century Reanalysis (20CR). Recuperado de https://www.psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/

22 Luis Fernando Alvarado Gambóa. Meteorólogo. Mensajería de texto con el autor, 12 de agosto de 2020.

23 Luis Fernando Alvarado Gambóa. Meteorólogo. Mensajería de texto con el autor, 12 de agosto de 2020.

24 Luis Fernando Alvarado Gambóa. Meteorólogo. Mensajería de texto con el autor, 12 de agosto de 2020.

25 AHABAT. Fondos antiguos, caja 356, tomo 1, folio 355. 11 de junio de 1886.

26 Diario de Costa Rica. 1886. 22 de junio, p. 2.

27 Jiménez, Lesmes. "Informe". La Gaceta. 1886, 6 de agosto, p. 1.

28 Diario de Costa Rica. 1886. 22 de septiembre, p. 3.

29 Castro, F. Rob. "sin titulo". *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1 y 2.

30 Willis, C. F. "Informe". La Gaceta. 1886, 14 de octubre, p. 1.

31 Mora C. "Nota 244". *La Gaceta.* 1886. 16 de octubre, p. 434.

32 *La Chirimia*. 1886. 9 de octubre, p. 4.

33 *La República.* 1886. 7 de octubre, p. 2.

34 La República. 1886. 6 de octubre, p. 3.

35 La República. 1886. 7 de octubre, p. 2.

36 *La República*. 1886. 8 de octubre, p. 3.

37 "Tiempo". *La República*. 1886. 7 de octubre, p. 2.

38 Redacción. "Tiempo". *La República*. 1886. 4 de noviembre, p. 2.

39 "Tiempo". *El Comercio: semidiario de la mañana*. 1887. 1 de enero, p. 5.

40 El destacado en negrita es del autor del artículo: "1886". La Gaceta. 1887, 5 de enero, p. 1.

41 "Tiempo". *La República*. 1886. 7 de octubre, p. 2.

42 "Habiendo fiebres". Diario de Costa Rica. 1886, 1 de septiembre. p. 2. "Plausible Medida". *La República*. 1886, 22 de septiembre, p. 3.

43 *Detritus* es un término usado en medicina para referirse a los restos de la materia sólida en descomposición dispersados en partículas.

44 *La Gaceta*. 1886. 30 de diciembre, p. 691.

45 Mora, C. "Telegrama de Aserrí". *La Gaceta*. 1886. 12 de octubre, p. 1.

46 Recuérdese que el Colón como moneda de Costa Rica se estableció en 1896 bajo la administración de Rafael Yglesias Castro.

47 "Leña". El Comercio. Semidiario de la mañana. 1886. 11 de noviembre, p. 2.

48 Una fanega equivale a 46,2 kg café oro, que corresponden a 258 kg en el sistema métrico decimal.

49 La República. 1886. 4 de noviembre, p. 2 y El Comercio. 1886. 4 de diciembre, p. 3.

50 "Revista Comercial". *El Comercio*. 1886. 4 de diciembre, p. 3.

51 Dengo, Manuel V. "Oficio 194. Superintendencia de la División Central del Ferrocarril". *La Gaceta*. 1886. 7 de octubre, p. 1. y Quirós, Juan V. "Cartago". *La República.* 1886, 7 de octubre, p. 3.

52 *La República*. 1886. 8 de octubre, p. 2.

53 Mora, C. "Telegrama de Aserrí". La Gaceta. 1886. 12 de octubre, p. 1. Mora C. "Nota 351". La Gaceta. 1886. 16 de octubre, p. 434 y *La República*. 1886. 13 de octubre, p. 2.

54 Mora C. "Nota 244". *La Gaceta.* 1886. 16 de octubre, p. 434.

55 Soto, Maurilio. "Telegrama de Alajuela". *La Gaceta*. 1886. 7 de octubre, p. 1.

56 Jiménez, Lesmes S. "Oficio No. 822". *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1 y Jiménez Soto, Jesús. "Telegrama". La Gaceta. 1886. 12 de octubre, p. 2.

57 Jiménez, Lesmes S. "Oficio No. 822". *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1. Jiménez Soto, Jesús. "Telegrama de Atenas". *La Gaceta.* 1886. 9 de octubre, p. 2.

58 Jiménez, Ramón. "Telegrama". *La Gaceta.* 1886. 10 de octubre, p. 1

59 Soto, Maurilio. "Telegrama de Alajuela". La Gaceta. 1886. 9 de octubre, p. 1.

60 *La Gaceta*. 1886. 6 de octubre, p. 1.

61 *La Gaceta*. 1886. 6 de octubre, p. 1. República. 1886. 7 de octubre, p. 2 y 8 de octubre, p. 2 y 3.

62 *La Gaceta*. 1886. 6 de octubre, p. 1.

63 Flores, Juan J. "Telegrama de Heredia". *La Gaceta*. 1886. 7 de octubre, p. 1. Flores, Juan J. "Telegrama de Heredia". *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1.

64 *La República*. 1886. 8 de octubre, p. 2. *La República.* 1886. 17 de octubre, p. 2.

65 *El Comercio*. 1886. 4 de diciembre, p. 3 y 4.

66 Flores, Juan J. "Telegrama de Heredia". *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1. AAHBAT. Fondos antiguos, Caja 383, folio 86

67 Flores, Juan J. "Telegrama de Heredia". *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1. *La República*. 1886. 17 de octubre, p. 2. Flores, Juan J. "No. 329". La Gaceta. 1886. 16 de octubre, p. 2.

68 Wills, F.C. "Ferrocarril". *La República.* 1886. 8 de octubre, p. 2. *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1

69 Castro, F. Rob. "Dirección general del Telégrafo". La Gaceta. 1886. 12 de octubre, p. 2; Castro, F. Rob. "Oficio No 104". La Gaceta. 1886. 14 de octubre, p. 1.

70 La República. 1886. 19 de noviembre, p. 2.

71 Matamoros, Luis. "Telegrama de Puntarenas". *La Gaceta*. 1886. 7 de octubre, p. 1.

72 Castro, F. Rob. "Oficio No. 93". *La Gaceta.* 1886. 8 de octubre, p. 1.

73 La República. 1886. 9 de octubre, p. 2.

74 La República. 1886. 9 de octubre, p. 2.

75 Peraldo Huertas, Giovanni y Ernesto Rojas Cedeño. "La deslizable historia del ferrocarril..." p.

76 Wills, F.C. *La Gaceta.* 1886. 10 de octubre, p. 1, y Keith, Minor C. "Carta". *La Gaceta.* 1886. 11 de noviembre, p. 523.

77 Keith, Minor C. "Carta". *La Gaceta*. 1886. 11 de noviembre, p. 523 y Jiménez, J.M. "Carta". *La Gaceta*. 1886. 13 de noviembre, p. 531.

78 El Comercio. 1886. 18 de noviembre, p. 3.

79 "Carretera a Carrillo". *El Comercio. Semidiario de la mañana.* 1886. 18 de noviembre, p. 2.

80 J.M. "Carta". La Gaceta. 1886. 13 de noviembre, p. 531.

81 Keith, Minor C. "Carta". *La Gaceta.* 1886. 13 de noviembre, p. 531.

82 Matamoros, Luis. "Oficio No. 92". La Gaceta. 1886, 10 de julio, p. 2

83 Jiménez, Lesmes. "Informe". La Gaceta. 1886, 6 de agosto, p. 1.

84 Jiménez, Ramón. "Telegrama". *La Gaceta.* 1886. 10 de octubre, p. 1

85 *La República.* 1886. 13 de octubre, p. 2

86 Mora, C. "Telegrama de Aserrí". La Gaceta. 1886. 12 de octubre, p. 1.

87 Mora C. "Nota 244". *La Gaceta.* 1886. 16 de octubre, p. 434.

88 Mora, C. "Nota 362í". *La Gaceta*. 1886. 4 de noviembre, p. 499

89 Aguilar B., F. "Nota de gobernación". La Gaceta, 24 de diciembre de 1886, p. 673.

90 Mora, C. "Nota 362í". *La Gaceta*. 1886. 4 de noviembre, p. 499

91 Castro, F. Rob. "sin titulo". La Gaceta. 1886. 14 de octubre, p. 1.

92 Dengo, Manuel V. "Informe". La Gaceta. 1886. 14 de octubre, p. 1.

93 Jiménez, Odilón. "Informe". La Gaceta. 1886. 14 de octubre, p. 1 y 2.

94 *La República*. 1886. 19 de noviembre, p. 3.

95 Keith, Minor. "Carretera a Carrillo". El Comercio. 1887, 1 de enero, p. 4.

96 "Caminos". *El Comercio. Semidiario de la mañana.* 1886. 4 de diciembre, p. 3 y 18 de diciembre, p. 3.

Desviaciones entre predicciones y mediciones de las mareas en Costa Rica, América Central

OMAR G. LIZANO [1]
RODNEY E. MORA ESCALANTE [2]

Resumen

Las predicciones de marea que se usan en Costa Rica, están basadas en mediciones del nivel del mar de hace 40-50 años, y nunca se han evaluado las desviaciones de dichas predicciones con las mediciones reales. Este estudio evalúa el grado de ajuste de estos modelos predictivos, usando los datos de los mareógrafos que recientemente se han instalado en algunas costas de Costa Rica y con algunos registros históricos de mareas. Los resultados demuestran que las predicciones reproducen el patrón de las mediciones. Sin embargo, hay diferencias en ámbito de los valores de ambas series, lo que evidencia una falta de ajuste de datos. Las mediciones que se han hecho en Bahía Culebra del Pacífico Norte de Costa Rica, demuestran que hay grandes desviaciones con las predicciones. Las desviaciones son relativamente menores con las predicciones de la estación mareográfica de San Juan del Sur de Nicaragua, lo que indica la necesidad de mayor investigación en este campo en la región de América Central. La dinámica de nuestros mares y costas ha estado cambiando, y seguirá cambiando, por lo que es necesario un nuevo banco de datos que permitan la actualización de los niveles mareográficos en las costas de Costa Rica. Con esto se lograría no solo orientar las políticas sobre la Zona Marítima Terrestre (ZMT), sino que actualizar los modelos oceanográficos para el país.

PALABRAS CLAVE: MAREAS, COSTAS CARIBE Y PACÍFICO, COSTA RICA**,** PREDICCIÓN, ESTACIÓN DE MAREA, DESVIACIONES.

Abstrat

The tidal predictions used in Costa Rica are based on sea level measurements from 40-50 years ago. The deviations in these predictions with the measurements have never been evaluated. This study evaluates the degree of adjustment of these predictive models using the data of the tide gauges that have recently been installed in some Costa Rican coasts and also with some historical tide records. The results demonstrate that the predictions reproduce the pattern of the measurements. However, there are differences in the range values of both series, which shows the need of data adjustment. The measurements that have been made in Bahia Culebra in the North Pacific of Costa Rica show that there are significant differences with the predictions. The deviations are relatively minor with the predictions of the San Juan del Sur tidal station in Nicaragua, indicating the need for more research in this field in Central America. The dynamics of our seas and coasts has been changing, and will continue to change, which is why a new database is necessary to allow an update of the tidal levels on Costa Rican coasts. With this, it is possible not only to orient the policies on the Terrestrial Maritime Zone (ZMT), but also to update the oceanographic models and the applications derived from the knowledge of a new mean sea level for the country.

KEY WORDS: TIDES, CARIBBEAN AND PACIFIC COASTS, COSTA RICA, PREDICTION, TIDE STATION, DIFFERENCES.

1 Doctor en Oceanografía Física. Módulo de Información Oceanográfica (MIO). CIMAR. Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: omar.lizano@ucr.ac.cr.

2 M.Sc. en Oceanografía Física. Módulo de Información Oceanográfica (MIO). CIMAR. Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: rodney.moraescalante@ucr.ac.cr.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las mareas es muy importante en la realización de múltiples actividades humanas, en la seguridad de la navegación marina en aguas poco profundas y en los trabajos de ingeniería costera. Son generadas principalmente por la Luna y en segundo término por el Sol. Al estar más cerca la Luna de la Tierra, produce mayor fuerza gravitacional que el Sol, por lo que su influencia sobre las mareas es mayor (Knauss, 1976). Como la posición de la Luna y del Sol se puede predecir con precisión cada día, con un estudio histórico de las compontes de las mareas en un lugar, se puede saber el comportamiento del componente astronómico de la marea a futuro con gran precisión, por eso se dice que las mareas se predicen, no se pronostican.

Tal como lo menciona Lizano (2006), las mareas son influenciadas por una gran cantidad de fenómenos tanto atmosféricos, como oceánicos. Las mareas experimentan cambios al entrar en las plataformas continentales: fricción, asomeramiento (cambio de la longitud y altura de la onda), compresión lateral (aumento de altura al entrar en una bahía o golfo estrecho), refracción (cambio de dirección y altura), reflexión y resonancia. También pueden ser influenciadas por la rotación de la Tierra, el viento, la presión atmosférica y por las corrientes marinas (Pugh, 1987).

Según el *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL), en 1941 se iniciaron mediciones del nivel del mar en Puntarenas. Se tomaron datos continuos hasta 1966 (Caldwell, Merrifield & Thompson, 2015), con lo cual se establecieron las componentes que generan la marea y desde el análisis armónico de las mismas, se elaboraron las predicciones para este lugar. Puntarenas se constituyó en la estación de referencia del Pacífico de Costa Rica (Lizano, 2006), sobre la cual se generaron las predicciones para las otras estaciones subordinadas de la costa Pacífica, utilizando ajustes en tiempo y altura.

Según Lizano (2006), es claro que las mareas en Costa Rica tienen características distintas entre ambas costas y aunque en el Pacífico las mareas tienen el mismo patrón semidiurno, presentan variaciones en el ámbito de altura según las características morfológicas y batimétricas de los sitios en donde se ubican.

La mayoría de casas comerciales como NOBELTEC, BUOYWEATHER, SURFLINE, WXTIDE32, STORM-SURF, entre otras, que ofrecen información oceanográfica, utilizan las predicciones en aplicaciones para celulares y computadoras para presentar información de mareas. Por ejemplo, desde NOBELTEC se pueden obtener predicciones desde el año 1901 hasta el 2099 (Anónimo, 2002).

El Módulo de Información Oceanográfica (MIO) del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica (UCR), también ofrece esta información al usuario del mar y se coloca en la plataforma Web o en la aplicación móvil (MIO CIMAR). Tal como lo menciona Lizano (2006), estas componentes para elaborar las predicciones fueron calculadas por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y por la Canadian Hydrographic Service (CHS), hace mucho tiempo atrás.

Hasta el momento, no se conoce algún estudio en Costa Rica que determine la validez de las predicciones de marea respecto de las mediciones. Con la disponibilidad de datos mareográficos de estaciones funcionando actualmente en nuestras costas y de algunos registros temporales históricos en lugares del Pacífico de Costa Rica, el presente artículo estudia las desviaciones entre estas dos fuentes de información. Esto permite evaluar el grado de exactitud de las predicciones de marea, la pertinencia de hacer nuevas mediciones y/o predicciones, o en su defecto, calcular los respectivos ajustes del nivel del mar para nuestras costas.

2. METODOLOGIA

Las series de los mareógrafos que actualmente están haciendo mediciones en las costas del país: Limón, Quepos e Isla del Coco, fueron obtenidas desde la página web de la Universidad de Hawaii. Las series históricas, como la de Puntarenas, también fue obtenida de la Universidad de Hawaii. Dichas series son registros horarios y tienen su debido Control de Calidad (CC). Las mediciones de la Marina de los Sueños en Bahía Herradura y las de la Marina de Papagayo en Bahía Culebra, no tienen su respectivo CC y son mediciones hechas minuto a minuto. Estas series fueron digitalizadas con programas en Fortran, para ajustarlas a series horarias. Estos datos fueron suministrados por la Red de Observación del Nivel del Mar de América Central (RONMAC) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).

Los datos medidos por los mareógrafos tienen niveles de referencia distintos y no están referidos a los niveles mareográficos convencionales (Lizano, 2009). A todas las series se les eliminó la tendencia (utilizando la función "detrent" de Matlab, que sustrae la línea de mejor ajuste de los datos) y sus valores promedios fueron igualados a "0" (cero). De esta forma, al superponerlas fue más fácil visualizar sus diferencias y calcular el Error Medio Cuadrático (RMSE) que identificara su mejor ajuste.

La Raíz del Error Medio Cuadrático, definida como $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^{N}(M_i - O_i)^2}$ por Schiller and Brassington (2011), fue calculado para evaluar el grado de ajuste o desviaciones en los valores de las series, donde "M" indica la predicción y "O" representa la medición.

3. RESULTADOS

En la figura 1, se presenta la posición de las siete estaciones mareográficas utilizadas en este estudio.

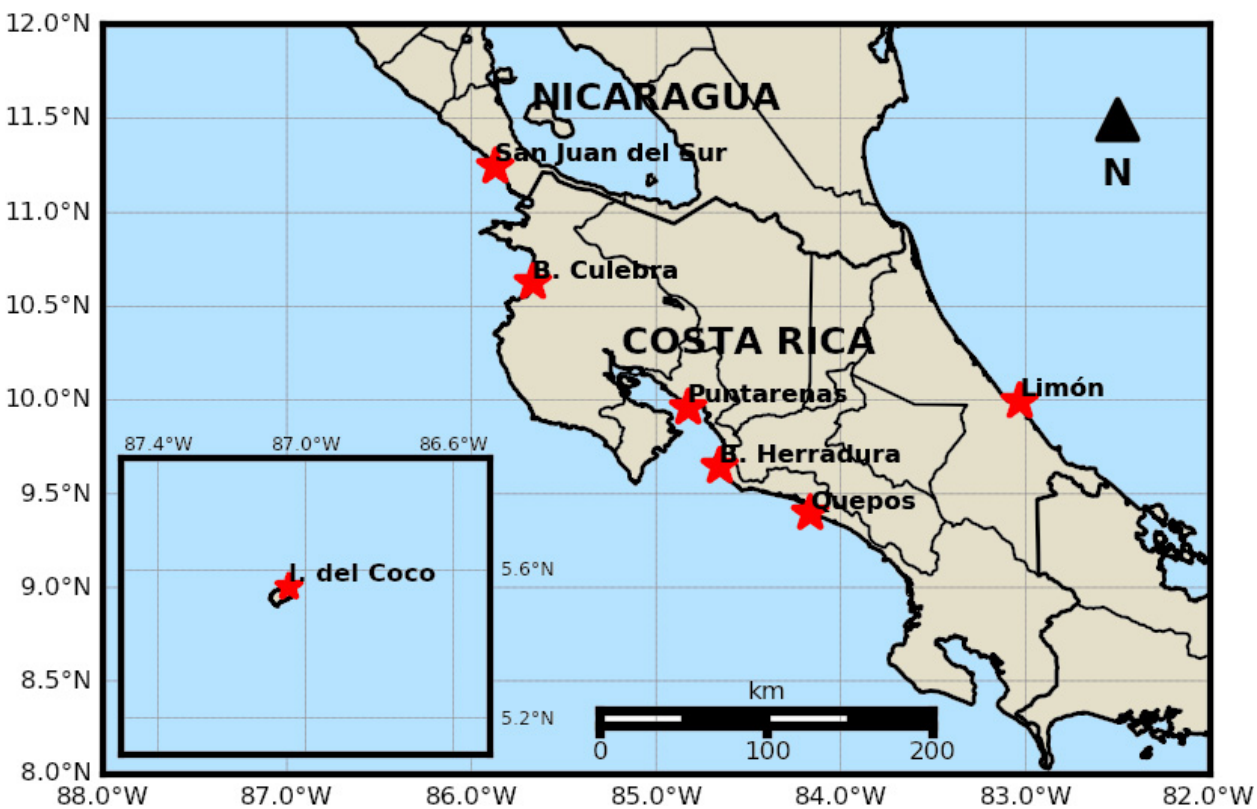


Figura 1. Mapa de ubicación de las estaciones mareográficas.

3.1. Predicciones y mediciones de marea en estaciones del Pacífico Central

La figura 2 presenta las predicciones y las mediciones de la marea horaria, en un mes particular, que se hicieron en Puntarenas mientras el mareógrafo estuvo funcionando. Se muestra la típica variación de la marea en un mes, con sus máximos quinquenales (Luna Nueva y Luna Llena) debido a la declinación de la Luna y el Sol, respecto del ecuador geográfico (Pugh, 2004). Esta marea coincidió con la marea equinoccial de otoño (Pugh, 2004; Lizano, 1997), con máximos de ámbito de marea alrededor de los días 27 y 28, con 3,71 m que corresponde a 3,29 m sobre del promedio de bajamares de sicigia, más 0,42 m bajo el promedio de sicigias (Lizano, 1997), la marea más alta que se puede dar en Puntarenas según las predicciones (Lizano, 1997; Lizano y Lizano, 2010).

En el cuadro 1 se muestra que para el Pacífico de Costa Rica, los valores de las predicciones y las mediciones de Puntarenas tienen las menores diferencias en las series estudiadas para esa región. La diferencia máxima calculada entre las pleamares (o bajamares) de un mismo ciclo de marea de las series fue de 0,24 m.

En la figura 3 se muestran las predicciones y mediciones de la estación ubicada en la Marina de Los Sueños, Bahía Herradura (ver figura 1). Es

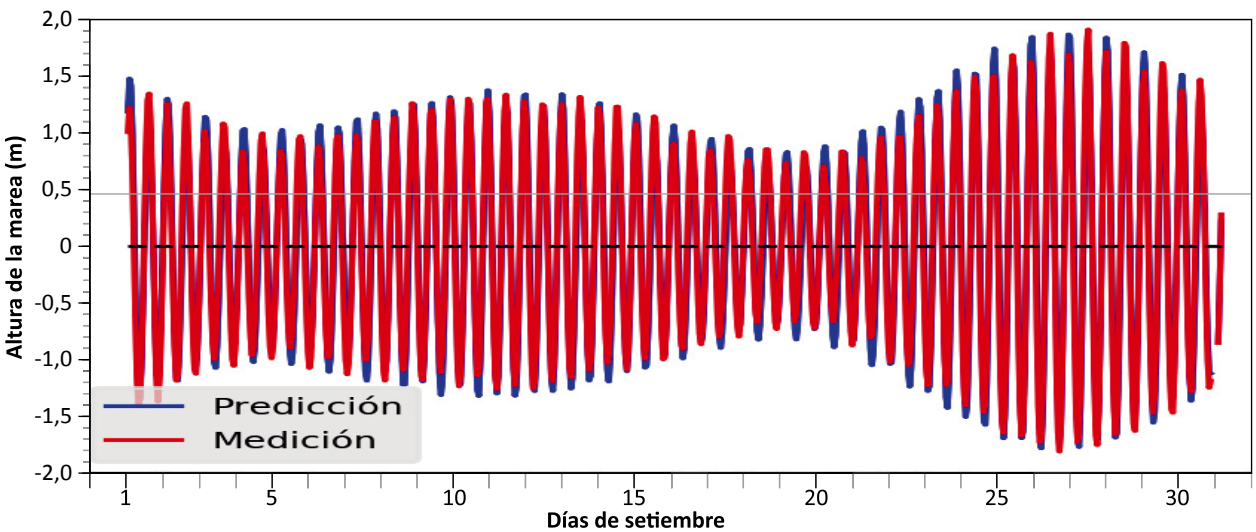


Figura 2. Datos horarios de predicción y medición de la marea en Puntarenas para el mes de setiembre de 1980.

Cuadro 1. Algunas características de las pronosticadas y medidas

Series	Periodo	RSME (m)	Máxima diferencia (m)*
Puntarenas	Set., 1980	0,20	0,24
Bahía Herradura	May., 2015	0,25	0,45
Quepos	Feb., 2020	0,21	0,34
Isla del Coco	Feb., 2020	0,32	0,48
Bahía Culebra	Set., 2015	0,29	0,63
B. Culebra y SJ del Sur	Set., 2015	0,21	0,27
Limón	Oct., 2019	0,04	0,10

*Corresponde a la máxima desviación encontrada entre las pleamares (o bajamares) de un mismo ciclo de marea entre ambas series.

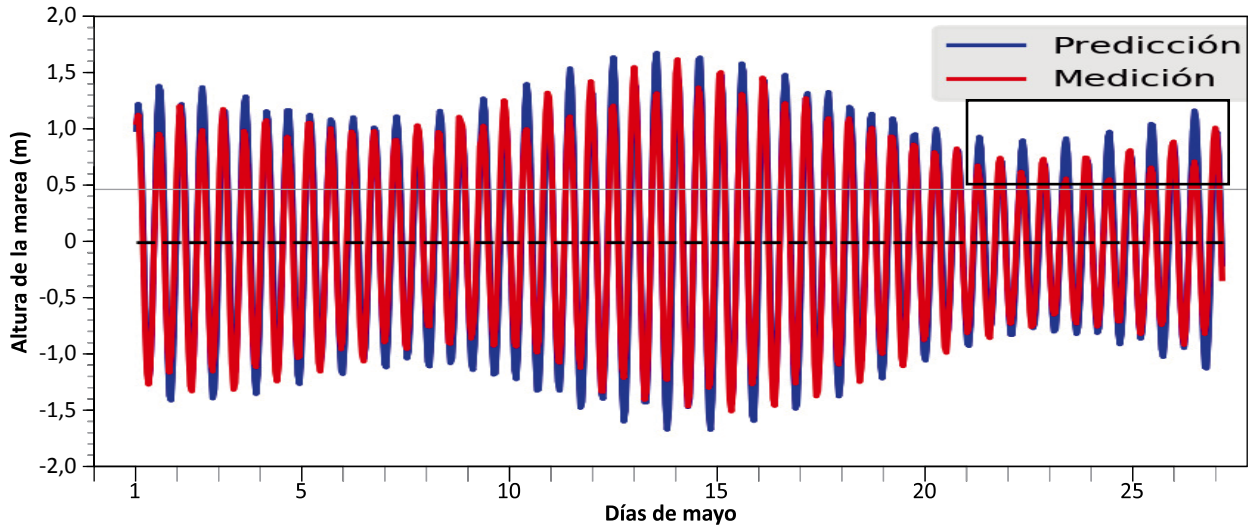


Figura 3. Predicción y medición de las mareas en Bahía Herradura para el mes de mayo del 2015.

pertinente mencionar, que las mediciones en este sitio, para ese mes, tienen una pendiente negativa en la serie (-0,0019 m/min), la cual fue removida para correlacionarla con las predicciones. En la figura 3 se incluye un recuadro que muestra parte de la serie que será analizada posteriormente.

Ambas series siguen el mismo patrón, sin embargo, se muestra más desviación en los máximos y mínimos (pleamares y bajamares) de ambas series. Las diferencias entre ellas son mayores (0,25 m) que la de Puntarenas, como muestra el cuadro 1. En su mayoría, las predicciones son sobrestimadas con respecto de las mediciones. Diferencias de hasta 0,45 m pueden medirse entre algunos máximos o mínimos de las series.

Se ha señalado un recuadro que muestra diferencias interesantes en la desigualdad diurna, que están presentes en las mediciones y que no se reflejan en las predicciones, tal como se muestra en la figura 4.

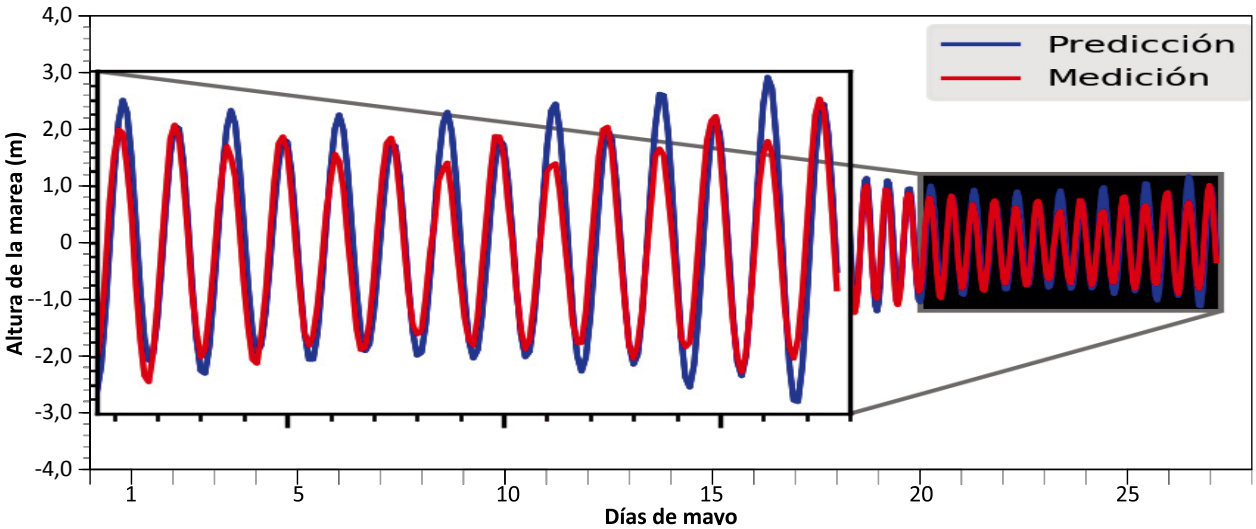


Figura 4. Ampliación de las predicciones y mediciones de la marea en Bahía Herradura, correspondiente al periodo del 20 al 27 de mayo del 2015 (área sombreada).

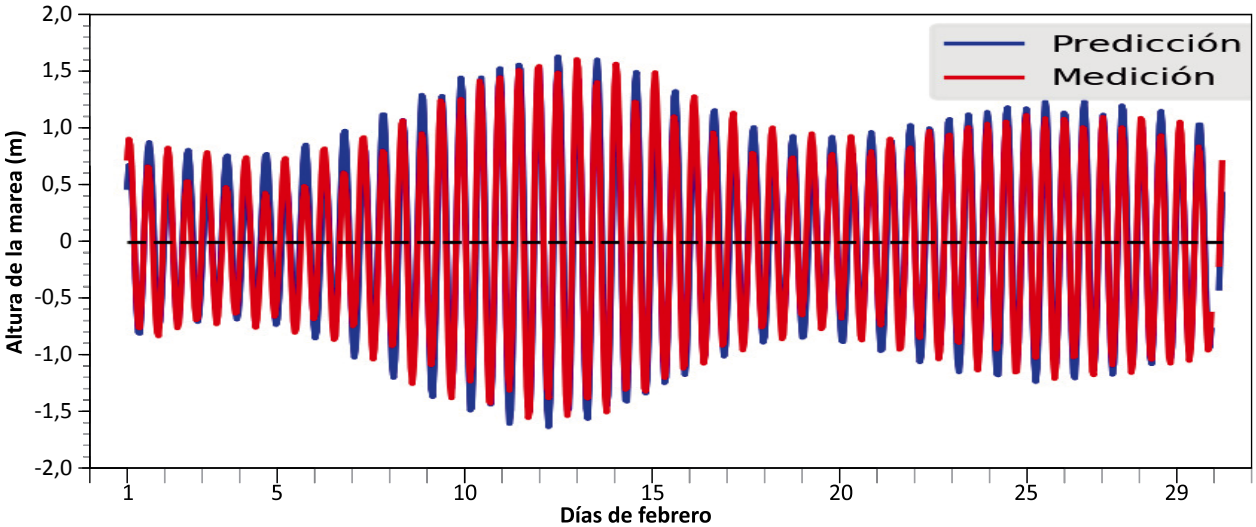


Figura 5. Predicción y medición de la marea en Puerto Quepos para el mes de febrero del 2020.

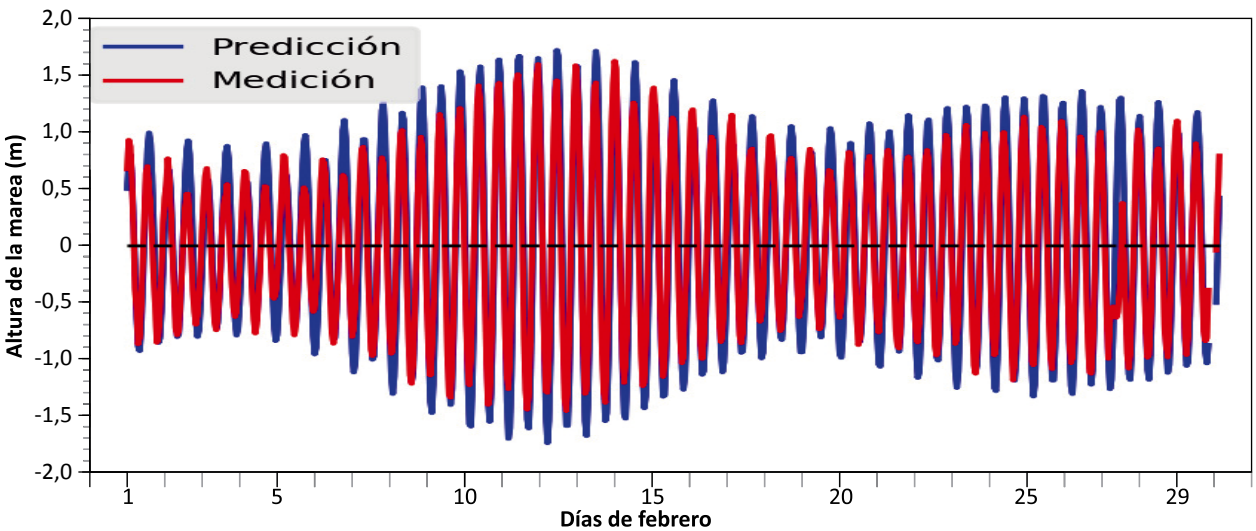


Figura 6. Predicción y medición de la marea en la Isla del Coco para el mes de febrero del 2020.

En la figura 5 se muestran las predicciones y mediciones de la marea en Puerto Quepos. Las desviaciones entre ellas (RMSE) son similares a las series de Puntarenas (cuadro 1). La diferencia máxima entre algunos ciclos de marea fue de 0,34 m.

En la figura 6 se muestran las variaciones de las predicciones y mediciones para la Isla del Coco. Ambas series siguen el mismo patrón. También se nota el mismo sesgo de los modelos al sobrestimar las predicciones, aunque aquí el error (RMSE) es el mayor de todos los sitios.

3.2. Predicciones y mediciones de marea en el Pacífico Norte

La serie de mareas medida en Bahía Culebra, también mostró una tendencia positiva (0,0064 m/min). Una vez eliminada la tendencia de las mediciones, la comparación con las predicciones en Bahía Culebra, se muestran en la figura 7.

Aunque ambas series siguen al mismo patrón, es claro que existe una diferencia sensible entre los máximos y los mínimos de los ciclos de marea de

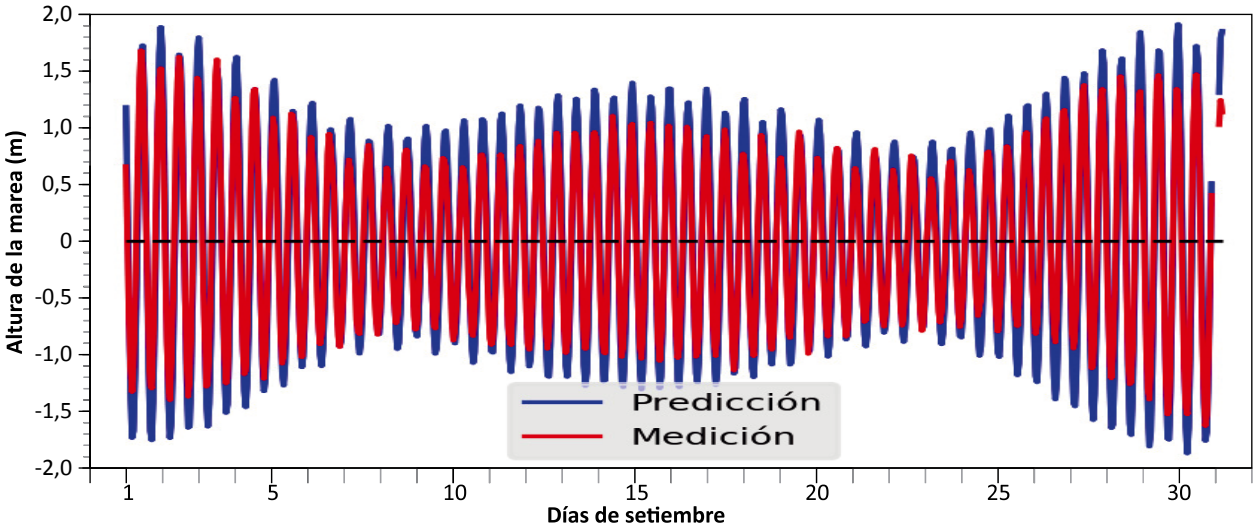


Figura 7. Variación de la marea predicha y medida en Bahía Culebra en el mes de setiembre del 2015.

ambas series, siendo mayores las predicciones en todos los casos. El RMSE (0,29 m) tiene uno de los valores más altos de todas las series estudiadas. También tiene la mayor diferencia máxima entre valores de las pleamares o bajamares de las series 0,63 m (ver cuadro 1).

Dado los resultados que obtuvo Lizano (2017, 2016-a, 2015 y 2014), en mediciones que hiciera en esta región en estudios privados, y dadas las menores diferencias entre valores de las pleamares y valores de las bajamares que mostraban las series de estos sitios con las predicciones de San Juan del Sur de Nicaragua, que con las de Bahía Culebra, se buscó el grado de ajuste de la serie medida con la predicción de San Juan del Sur de Nicaragua. La figura 8 muestra estos resultados.

Es evidente el mejor ajuste (las menores desviaciones, RMSE = 0,21 m) entre estas dos series. Desviaciones máximas de 0,27 m (ver cuadro 1) se pudieron calcular para algunas

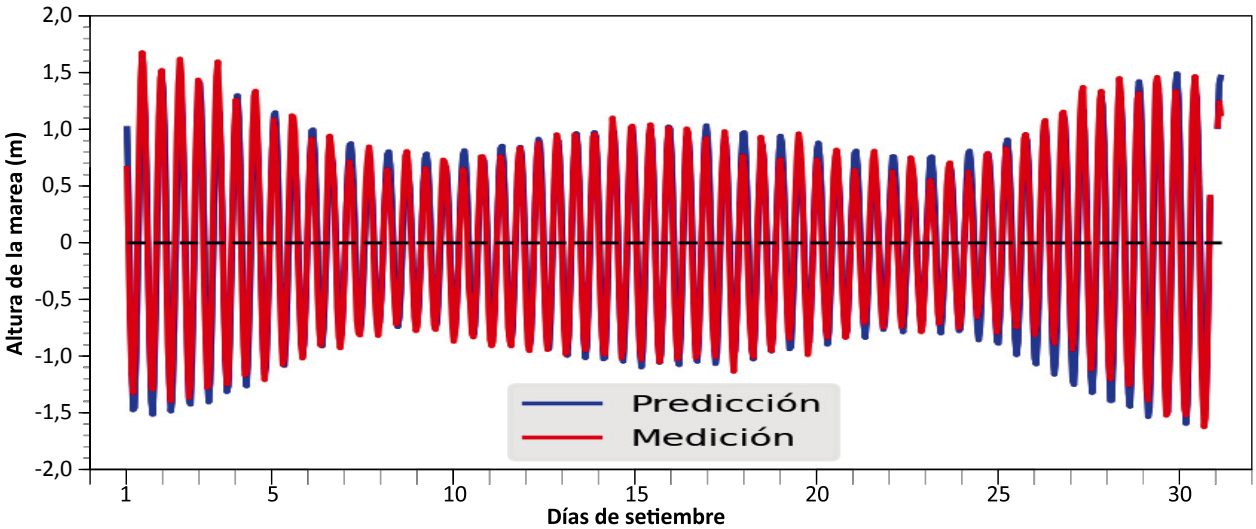


Figura 8. Variación de la marea predicha para San Juan del Sur de Nicaragua y la medida en Bahía Culebra en el mes de setiembre del 2015.

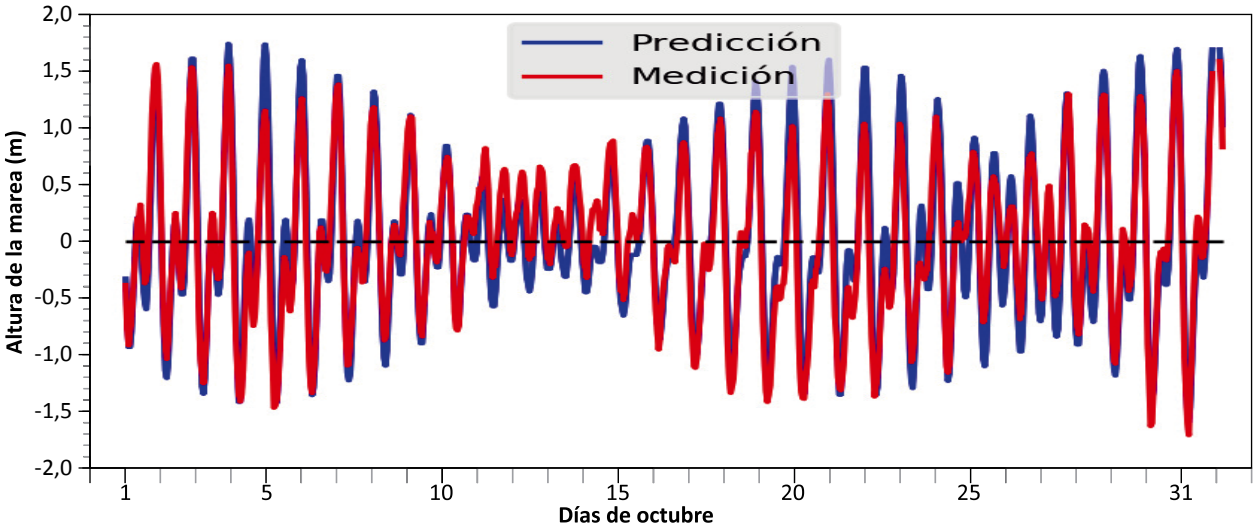


Figura. 9. Variación de la marea pronosticada y medida en Limón para el mes de octubre del 2019.

bajamares, lo cual es menor que la desviación calculada anteriormente con las predicciones de Bahía Culebra.

3.3. Predicciones y mediciones de marea en el Caribe

En la figura 9 se muestran las series de predicciones y mediciones de la marea en Puerto Limón. Ambas series se ajustan a un mismo patrón. La desviación máxima en este caso fue de 0,10 m, considerado alto en relación a las características del rango promedio de las mareas de 0,21 m para este sitio (Lizano, 2006). Sin embargo, dado el menor ámbito de marea de estas series y las diferencias entre los ciclos de marea, el RMSE es el menor de todos los casos estudiados (cuadro 1), lo que significa que esta estación tiene la menor dispersión de los datos predichos respecto de los medidos.

4. CONCLUSIONES

Aunque se hizo un muestreo, casi aleatorio y según la disponibilidad de registros de algunas mediciones de marea en las costas de Costa Rica, es evidente que las predicciones tienen diferencias significativas según el lugar de medición.

Las predicciones de Puntarenas fueron levantadas con registros de marea de al menos 20 años, tiempo necesario para tener todas las variaciones astronómicas de la Luna (Lizano, 1997). Sin embargo, aún hay desviaciones con las mediciones que se hicieron en 1980, y más aún, en las estaciones subordinadas como Quepos y la Isla del Coco (febrero del 2020). Las predicciones de Bahía Herradura (basadas en ajustes de la estación de referencia de Puntarenas, Lizano (2006)), tienen una mayor dispersión entre los valores de sus series que la de Puntarenas. Diferencias de altura de 45 cm se pudieron encontrar como máxima en un mismo ciclo de marea entre sus series, siendo por lo general, mayores las predicciones que las mediciones. Pero además, en estas series de Bahía Herradura, como se puede ver en la figura 4, las predicciones no reproducen el patrón de desigualdad diaria (Pugh, 1987; Forrester, 1983), que sí tienen las mediciones (una marea alta más alta y la siguiente una alta más baja). Definitivamente en este lugar se hace necesario realizar más mediciones y nuevos ajustes en las predicciones.

En la Isla del Coco se notan diferencias importantes entre las predicciones y mediciones. Además, tiene el mayor valor del RMSE de todas las series medidas (ver cuadro 1). Es necesario realizar un análisis más detallado de las mediciones del mareógrafo recién instalado en la isla (Caldwell et al., 2015), que permita la elaboración de las respectivas componentes armónicas de la marea y se realicen los ajustes necesarios para tener mejores predicciones para este sitio.

Para el caso de Bahía Culebra, además de que los datos debieron ser sometidos a control de calidad (remover la tendencia), las predicciones propiamente del sitio, son mayores que las mediciones, con diferencias de más de 0,5 m. El análisis estadístico de estas series, muestra el segundo RMSE más alto de las series estudiadas (ver cuadro 1). Y como lo demuestra el mejor ajuste que tienen estas mediciones con la estación de San Juan del Sur de Nicaragua, es pertinente realizar más mediciones en este sitio y calcular los respectivos ajustes en las predicciones.

En el caso de Limón, se encontraron también diferencias significativas entre predicciones y mediciones. Más datos y ajustes se necesitan también para este lugar.

Tal como lo indica Pugh (1987), los niveles del mar varían según la dinámica oceánica y atmosférica del sitio. Es posible que parte de las diferencias encontradas entre las series, tengan relación con la dinámica propia del sitio, para el tiempo en que se hicieron las respectivas mediciones. Sin embargo, las predicciones de las mareas que actualmente se usan, se realizaron con mediciones del nivel del mar de Puntarenas de hace bastante tiempo, y para el resto de las estaciones subordinadas, con ajustes sin que se tomaran datos “in situ”. Desde entonces, han habido cambios en el océano y mares costeros de Costa Rica (Lizano, 2019; Lizano, 2016-b; Lizano, 2013; Lizano y Lizano, 2010), cambios atmosféricos (Alfaro, 2008; Alfaro y Hidalgo, 2016) y movimientos tectónicos (Amador et. al., 1994; Chacón y Protti, 2011), por lo que es de vital importancia tener y mantener, no solo los registros actuales del nivel del mar, sino extender mediciones a otros sitios. Solo de esta manera podremos actualizar nuestros niveles de referencia, determinar un nuevo nivel medio del mar, y con ello los niveles mareográficos y topográficos convencionales, como el nivel “0” de topografía y el nivel “0” de batimetría, la pleamar ordinaria, etc. Con esta información se podrá delimitar también la zona pública, calibrar los modelos de oceanográficos y actualizar las aplicaciones que se derivan de los mismos.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Red de Observación del Nivel del Mar de América Central (RONMAC) de la Universidad Nacional, por enviarnos las series de mediciones de mareas de Bahía Herradura y Bahía Culebra. A los lectores anónimos que revisaron este artículo y que con sus contribuciones mejoraron el mismo.

6. LITERATURA CONSULTADA

Amador, J., Chacón, E. y Lizano, O.G. (1994). Estudio de efectos geofísicos del Terremoto de Limón mediante percepción remota y análisis hidrometeorológico. *Revista Geol. América Central*. Vol. Esp. Terremoto de Limón: 153-170.

Anónimo. (2002). *Tides & Currents for Windows*. Noveltec Corporation. Portland, Oregon. 52 p.

Alfaro, E.J. (2008). Ciclo diario y anual de variables troposféricas y oceánicas en la Isla del Coco, Costa Rica. *Revista Biología Tropical*. Vol. 56 (Suplemento 2), 19-29.

Alfaro, E.J. & Hidalgo, H.G. (2016). Climate of an oceanic island in the Eastern Pacific: Isla del Coco, Costa Rica, Central America. *Revista de Biología Tropical*. Vol. 64 (Suppl. 1): S59-S74.

Chacón, S. & Protti, M. (2011). Modeling a tsunami from the Nicoya, Costa Rica, seismic gap and its potential impact in Puntarenas. *Journal of South American Earth Sciences*. 372-382.

Caldwell, P.C., Merrifield, M.A. & Thompson, P.R. (2015). *Sea level measured by tide gauges from global oceans.* The Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset, doi:10.7289/V5V40S7W.

Forrester, W.D. (1983). *Canadian Tidal Manual.* Department of Fisheries and Oceans. The Canadian Hydrographic Service. 135 p.

Knauss, J. (1976). *Introduction to Physical Oceanogrphy*. (2 ed.). New York, EEUU: Prentice Hall.

Lizano, O.G. (2019). El calentamiento global y su relación con el impacto en la pesquería en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. *InterSedes.* Vol. XX (41), 190-207.

Lizano, O.G. (2017). *Implementación de una planta desalinizadora en Playa Mina, Guanacaste: componente oceanográfica*. Informe Técnico no publicado.

Lizano, O.G. (2016-a). *Implementación de una planta desalinizadora en Playa Potrero, Guanacaste: componente oceanográfica*. Informe Técnico no publicado.

Lizano, O.G. (2016-b). Distribución espacio-temporal de la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto alrededor del Domo Térmico de Costa Rica. *Revista Biología Tropical*. Vol. 64 (Suppl. 1): S135-S152.

Lizano, O.G. (2015). *Determinación del nivel medio del mar en Playa Brasilito, y su relación con los mojones que definen la Zona Pública*. Contratado por Topografía Francisco Reyes. Guanacaste. Informe Técnico no publicado.

Lizano, O.G. (2014). *Reserva Conchal. Implementación de una planta desalinizadora en Brasilito, Guanacaste: componente oceanográfico*. Informe Técnico no publicado.

Lizano, O.G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*. Vol. XIV (17): 6-27.

Lizano, O.G. (2009). Batimetría, modelos de elevación digital y sus aplicaciones. *Azimuth*. Vol. 4(10): 18-21.

Lizano, O.G. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*. Vol. 24: 51-64.

Lizano, O.G. (1997). Las mareas extraordinarias de 1997 en la costa Pacífica de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. Vol. 4(2): 169-179.

Lizano, M.A. y Lizano, O.G. (2010). Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. *InterSedes*. Vol. XI (21): 215-229.

Permanent Service for Mean Sea Level (s.f.). *Página principal*. Recuperado de: https://www.psmsl.org

Pugh, D.T. (1987*). Tide, surges and mean sea-level*. John Wiley & Sons. Nueva York. 472 p.

Schiller, A. & Brassington, G. B. (2011). Operational Oceanography in the 21st century. *En Ocean Forecasting Systems: Product Evaluation and Skill*: 601-631. Springer, Dordrecht.

Universidad de Costa Rica (s.f.). *Módulo de Información Oceanográfica*. Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología. Recuperado de: https://www.miocimar.ucr.ac.cr

Universidad de Hawaii (s.f.). *Página principal*. Recuperado de: https://uhslc.soest.hawaii.edu/data/

Universidad Nacional (s.f.). *Red de Observación del Nivel del Mar de América Central.* Recuperado de: http://www.ronmac.una.ac.cr

Variables meteorológicas aeronáuticas en los cuatro aeropuertos internacionales de Costa Rica durante la influencia del ciclón tropical Nate

JOSÉ PABLO VALVERDE MORA [1]

Resumen

La influencia e interacción de los ciclones tropicales en Costa Rica son materia de mucho interés para su estudio, no solo desde el punto de vista social y económico, sino también, desde una perspectiva de seguridad en las operaciones aéreas de los aeropuertos (aeródromos) internacionales del país. El comportamiento de las variables meteorológicas aeronáuticas (viento, visibilidad, tiempo presente, nubosidad, temperaturas), de los aeródromos ubicados en ambas vertientes del país bajo la influencia de este tipo de sistemas, depende de factores propios del mismo (intensidad, velocidad de desplazamiento, ubicación), así como de factores geográficos de cada aeropuerto.

El caso del ciclón tropical Nate, trajo consigo las mayores afectaciones en la vertiente del Pacífico, con un predominio de viento del suroeste y oeste, magnitudes de ocho a 16 nudos, lluvias de variable intensidad, así como la presencia de nieblas y neblinas, donde las capas nubosas de alturas medias y bajas fueron otra constante que propició el descenso de las temperaturas medias. Esto en los Aeropuertos Internacionales Daniel Oduber en Liberia, Juan Santamaría en Alajuela y Tobías Bolaños en Pavas. En el caso del Aeropuerto Internacional de Limón, las condiciones meteorológicas aeronáuticas fueron mucho mejores.

PALABRAS CLAVE: AERÓDROMO, CICLÓN TROPICAL, METAR, NIEBLA, PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA, VIENTO.

Abstract

Tropical cyclones influence and interaction over Costa Rica is a matter of great interest for its study, not only from the social and economic point of view, but also, from security airports operations in the country. The aeronautical meteorological variables behavior (wind, visibility, present weather, cloudiness, temperatures) at the aerodromes in each slope, is translated into the state of the system and depends on their own factors (intensity, speed of displacement, location), as geographic information of each airport.

Tropical cyclone Nate brought the greatest impact on the Pacific slope, the wind predominated in the southwest and the west directions, magnitudes of eight to 16 knots, variable rainfall intensity with the presence of fog and mist, the cloud layers were of medium and low heights that cause the descent of the average temperatures. All this at the International Airports: Daniel Oduber (Liberia), Juan Santamaría (Alajuela) and Tobías Bolaños (Pavas). In the case of the Limón International Airport, the aeronautical meteorological, the conditions were much better.

KEY WORDS: AERODROME, TROPICAL CYCLONE, METAR, FOG, PRECIPITATION, TEMPERATURE, WIND.

1 M.Sc. en Meteorología. Departamento de Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: jpvalverde@imn.ac.cr

1. INTRODUCCIÓN

La temporada de ciclones tropicales para el Océano Atlántico y Mar Caribe, se establece a partir del primero junio y hasta el 30 de noviembre de cada año. Para el día nueve de agosto del 2017, la perspectiva climática dictaminada por Centro de Predicción del Clima de la NOAA, indicaba una temporada de ciclones tropicales con una probabilidad del 60% por encima de lo normal para todo el Atlántico y la cuenca del Caribe (CPC, 2017).

En referencia al cambio climático y al calentamiento antropogénico global, la mayoría de los modelos climáticos utilizados actualmente, proyectan una disminución en la frecuencia total de los ciclones tropicales globales y un aumento en el promedio de ciclones catalogados intensos (Murakami et al., 2014). Por otro lado, un estudio reciente que utiliza el tiempo de máxima intensidad de vida de los ciclones tropicales (LMI TC's), denota un aumento en la frecuencia de los ciclones tropicales, tanto para los más débiles como para los más intensos, mientras que la frecuencia de los ciclones tropicales moderados tiende a decrecer (Song, Klotzbach, Tang & Wang, 2018).

Con respecto a la frecuencia de afectación por parte de un ciclón tropical expresada por el estudio de Alvarado y Alfaro (2003), se tiene que en los meses de activación de la temporada de huracanes (junio-noviembre), la mayor frecuencia es de entre el 10 y 12%, específicamente para los meses de setiembre y octubre. Se debe destacar, en el caso de estudio del ciclón tropical Nate, inició su desarrollo desde la región de influencia ciclónica RIC-1 avanzando hasta la RIC-5, lo cual corresponde a trasladarse desde un área de afectación directa y fuerte, a un área de influencia débil o marginal (Alvarado y Alfaro, 2003). La trayectoria trazada por el sistema y las áreas de influencia discutidas anteriormente, se pueden observar en la figura 1.

Según lo reportado por The National Hurricane Center (2017), la actividad ciclónica ocurrida en la cuenca del Atlántico en el año 2017 estuvo sobre lo normal con un total de 17 tormentas, de las cuales 10 alcanzaron el grado de huracán y seis fueron catalogados como huracanes mayores.

Para Costa Rica se tiene conceptualizado un evento extremo como: "situación de emergencia donde un fenómeno hidrometeorológico causa alteraciones significativas en el estado del tiempo o del clima de alguna zona, y sus consecuencias son impactos negativos importantes en las actividades sociales y productivas" (IMN-CRRH, 2008, p.30). Desde este punto de vista, se considera que los efectos presentados por el ciclón tropical Nate sobre el país corresponden a un evento extremo.

1.1. Descripción del sistema y su evolución

Al hablar de los inicios del ciclón tropical Nate, se debe indicar que en este intervinieron varios sistemas meteorológicos típicos, estacionales e inmersos en los conocidos giros o vórtices centroamericanos. Estos vórtices son amplias áreas de circulación ciclónica en la baja tropósfera, con precipitaciones fuertes ampliamente dispersas y una mayor frecuencia de desarrollo de mayo a junio y de setiembre a noviembre (Papin, Bosart & Torn, 2017).

De acuerdo con el reporte del ciclón tropical Nate por parte del Centro Nacional de Huracanes (NHC) y los autores Beven & Berg (2018), uno de los tres vórtices de baja presión ubicado al suroeste del Mar Caribe, presentaba en sus vientos una circulación ciclónica cerrada para el día tres de octubre, además de áreas de convección profunda. Para el siguiente día a las 12 UTC[2] el sistema mostraba suficiente circulación y convección organizada, para catalogarse como depresión tropical (figura 2). Cerca de las 12 UTC del día cinco de octubre,

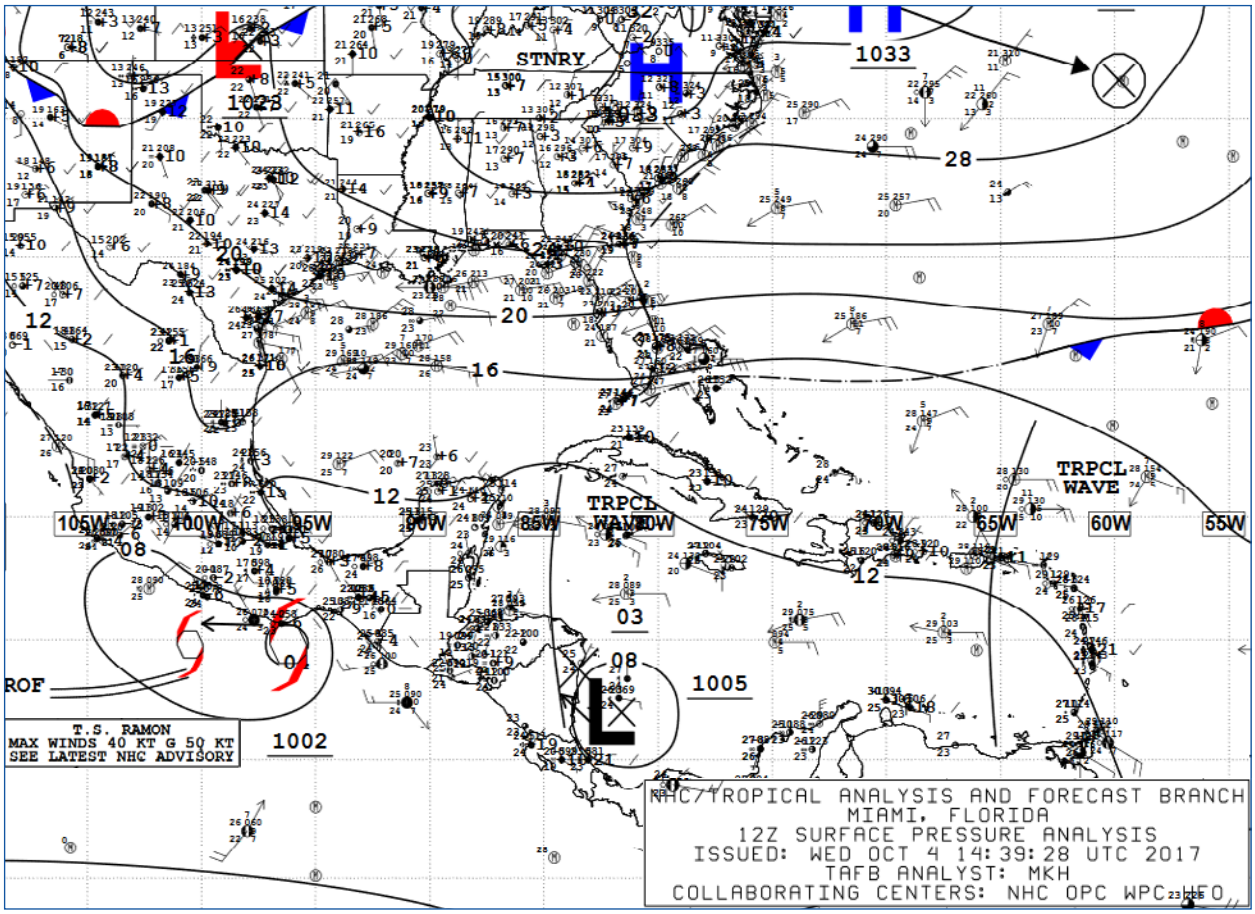
2 UTC: Tiempo Universal Coordinado (-6 h para hora local).

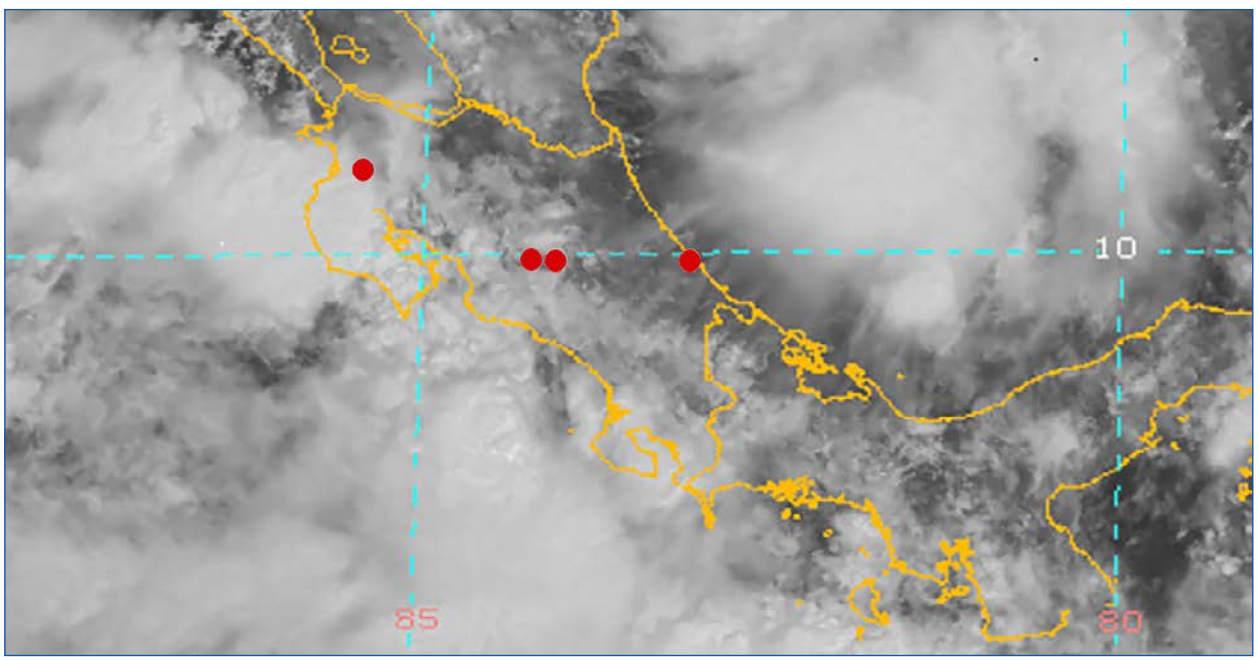
Figura 1. Trayectoria del ciclón Tropical Nate del día 3 al 7 de octubre de 2017. Regiones de Influencia de ciclones tropicales (RIC). Adaptado de Alvarado y Alfaro (2003).

antes que el sistema tocara tierra en la costa este de Nicaragua, su fortalecimiento gradual hizo que se le determinara como tormenta tropical y permaneció con esta categoría hasta el día siete de octubre, donde al transitar por el noroeste del Mar Caribe por el Canal de Yucatán, se intensificó hasta alcanzar la categoría de huracán, permaneciendo con ese grado de intensidad hasta acercarse a la costa sur del estado de Misisipi, EUA (Beven & Berg, 2018).

1.2. Justificación

El objetivo de este estudio fue poder describir las variables aeronáuticas más importantes para el desempeño de las operaciones aéreas en los aeródromos, además de conocer como estas cambian en tiempo y espacio con la presencia de un sistema de dimensiones sinópticas que se desplaza e intensifica.





G-13 IMG 04 OCT 2017 1645Z RAMSDIS-CIRA/RAMM

Figura 2. Análisis de superficie e imagen satelital donde se muestra la depresión tropical Nate, ubicada hacia el noreste de la costa Caribe de Costa Rica. Fuente: NHC y Goes-16.

Cuadro 1. Características de los aeropuertos y estaciones meteorológicas

Aeropuerto Código OACI	Horario de operaciones	Estaciones meteorológicas	Elevación (m)	Región climática
MRLB (Liberia)	12 – 06 UTC (18 h)	AWOS y Campbell Pista-07	89	Pacífico Norte (PN)
MROC (Alajuela)	00 – 24 UTC (24 h)	AWOS y Campbell Pista-07	890	Valle Central (VC)
MRPV (Pavas)	12 – 00 UTC (12 h)	Campbell Pista 27	997	Valle Central (VC)
MRLM (Limón)	12 – 00 UTC (12 h)	Campbell	5	Caribe Sur (CS)

Actualmente el país no cuenta con evidencia documentada, respecto al análisis de cambios importantes en las variables aeronáuticas con la presencia de eventos considerados extremos, que sirvan para la compresión del tipo de tiempo presente que estos involucran en los diferentes aeropuertos internacionales del país. El documentar este tipo de información, mejorará el análisis y la comprensión de estos fenómenos, además de ser un aporte para su incorporación en los pronósticos de aeródromo conocidos como TAF.

2. METODOLOGÍA

Para describir las variables meteorológicas aeronáuticas en los cuatro aeropuertos internacionales de Costa Rica y representar sus características producto de la influencia de un ciclón tropical, se utilizaron los reportes meteorológicos aeronáuticos de superficie conocidos como METAR (Valverde, 2018) de los aeropuertos: Daniel Oduber Quirós en Liberia (MRLB), Juan Santamaría en Alajuela (MROC), Tobías Bolaños Palma en Pavas (MRPV) y el Aeropuerto Internacional de Limón (MRLM), cuya ubicación se presenta en la figura 2 marcados con puntos rojos. Se seleccionaron los reportes correspondientes al periodo del 03 al 07 de octubre del 2017, en los que se presentó mayor afectación por parte del ciclón tropical Nate sobre el país.

Las variables descritas de forma horaria en este estudio son: el viento (dirección y velocidad), la visibilidad predominante, la precipitación (intensidad, tipo, acumulados horarios), la niebla, la altura de techo de nubes y la temperatura. Se completan las variables en el registro para los aeropuertos en los que el horario de operación difiere de 24 horas (con excepción de las variables observadas que son: visibilidad, nieblas y altura de techo de nubes), las cuales solo se presentan durante los periodos de registro operativo de cada aeropuerto. En el cuadro 1 se presentan las estaciones utilizadas en cada aeropuerto, el horario de operación y las características de las estaciones.

En este trabajo se consideró la definición de temporal como la condición meteorología en la que predominan cielos nublados, temperaturas bajas y lluvias de variable intensidad a cualquier hora del día (Alvarado y Alfaro, 2008).

3. RESULTADOS: ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES AERONÁUTICAS

3.1. Viento

La climatología del mes de octubre, en lo referente a la dirección del viento en las estaciones aeronáuticas ubicadas en la vertiente del Pacífico (MROC, MRLB y MRPV), es generada por la presencia de brisas de montaña y viento alisio para horas de la noche y madrugada, con velocidades del viento menores a los 6 kt (nudos)[3]; junto a la

3 1 kt = 1,85184 km/h.

ocurrencia de entrada de humedad producto de la brisa marina del océano Pacífico con direcciones que varían desde el sur al oeste, y con velocidades del viento no mayores a los 9 kt (IMN, 2017; IMN, 2016 y IMN, 2012).

La dirección del viento en el caso de los aeropuertos MROC y MRPV en presencia del ciclón tropical, inició variable o viento débil (trazos celestes en figura 3), posteriormente desde la mañana del día tres y hasta pasada la tarde del día seis, predominó con direcciones de los 200º a 300º (viento del suroeste-oeste), finalmente el día siete ocurrió lo típico para el mes de octubre, donde por la madrugada y mañana hubo presencia de brisas de montaña (dirección de los 50º), y posteriormente por la tarde se dio el retorno de la brisa del suroeste (figura 3).

En el caso del aeropuerto MRLB, las direcciones del viento al inicio del periodo fueron muy variantes, con viento del noreste o alisios junto al viento de componente oeste. Posteriormente, para la tarde del día cuatro y hasta el día seis se notó la persistencia del viento del suroeste (200º). Los dos últimos días del periodo registrado, mostraron variaciones en su dirección con la presencia del sureste (150º), alternado con viento del oeste de entre los 260° y 300° (figura 3).

En el caso de la climatología de Limón (MRLM) y con respecto a la dirección del viento, se tiene que en octubre predomina la brisa de montaña con componente del suroeste, con velocidades inferiores a los 4 kt durante horas de la noche y madrugada. Además, se da la presencia de vientos alisios del noreste la mayor parte de las horas del día, con intensidades entre los 8 kt y 11 kt (IMN, 2018).

Al final de los días del periodo en estudio, el aeropuerto de Limón presentó variaciones en la dirección de viento muy homogéneas (figura 3). La presencia del viento con direcciones de los 250º persistió a lo largo de la noche y primeras horas del día, mientras que direcciones del este o noreste se produjeron el resto de las horas de la tarde y las primeras horas de la noche. En los primeros dos días, las variaciones de la dirección del viento fueron irregulares, predominando en promedio los 250º, esto con la presencia del disturbio cerca de las costas de Limón (figura 3).

Las variaciones del viento en la vertical se obtuvieron de los lanzamientos de sondeos meteorológicos realizados desde la Garita de Alajuela, los mismos se hicieron a las 12 UTC de cada día desde el tres al nueve de octubre, además de un lanzamiento a las 18 UTC para el día 05 de octubre (figura 4). En dicha figura se puede observar el cambio de las direcciones bajo los 5 km, pasando del noroeste hasta el suroeste y duplicando sus intensidades de 15 kt hasta los 40 kt para los primeros tres días de influencia del ciclón tropical. Posteriormente, se tuvieron velocidades del viento inferiores, aún con direcciones del suroeste, para finalmente cambiar a direcciones de noreste y este en los primeros 5 km de la tropósfera baja (figura 4).

La intensidad del viento para los cinco días analizados (ver figura 5), muestra similitudes para los aeródromos del Valle Central. La velocidad alcanzó los mayores valores de intensidad horaria a partir del día en que el sistema se nombró depresión tropical (del cuatro de octubre en adelante), tomando valores de viento promedio de entre los 14 kt y 16 kt; posteriormente, sus valores disminuyeron hacia el día seis de octubre. Estas magnitudes fueron superiores a las registradas en la climatología para los vientos de componente oeste, en los tres aeropuertos analizados de la vertiente del Pacífico. Para el caso de Limón, la mayor intensidad del viento se registró el día cuatro de octubre, con un valor de 10 kt para direcciones de componente norte, esto como la mayor interacción del sistema sobre la región climática del Caribe Sur (figura 5).

Otra característica que se observó el día siete de octubre, fue el aumento súbito del viento (para todos los aeropuertos analizados) de 8 kt

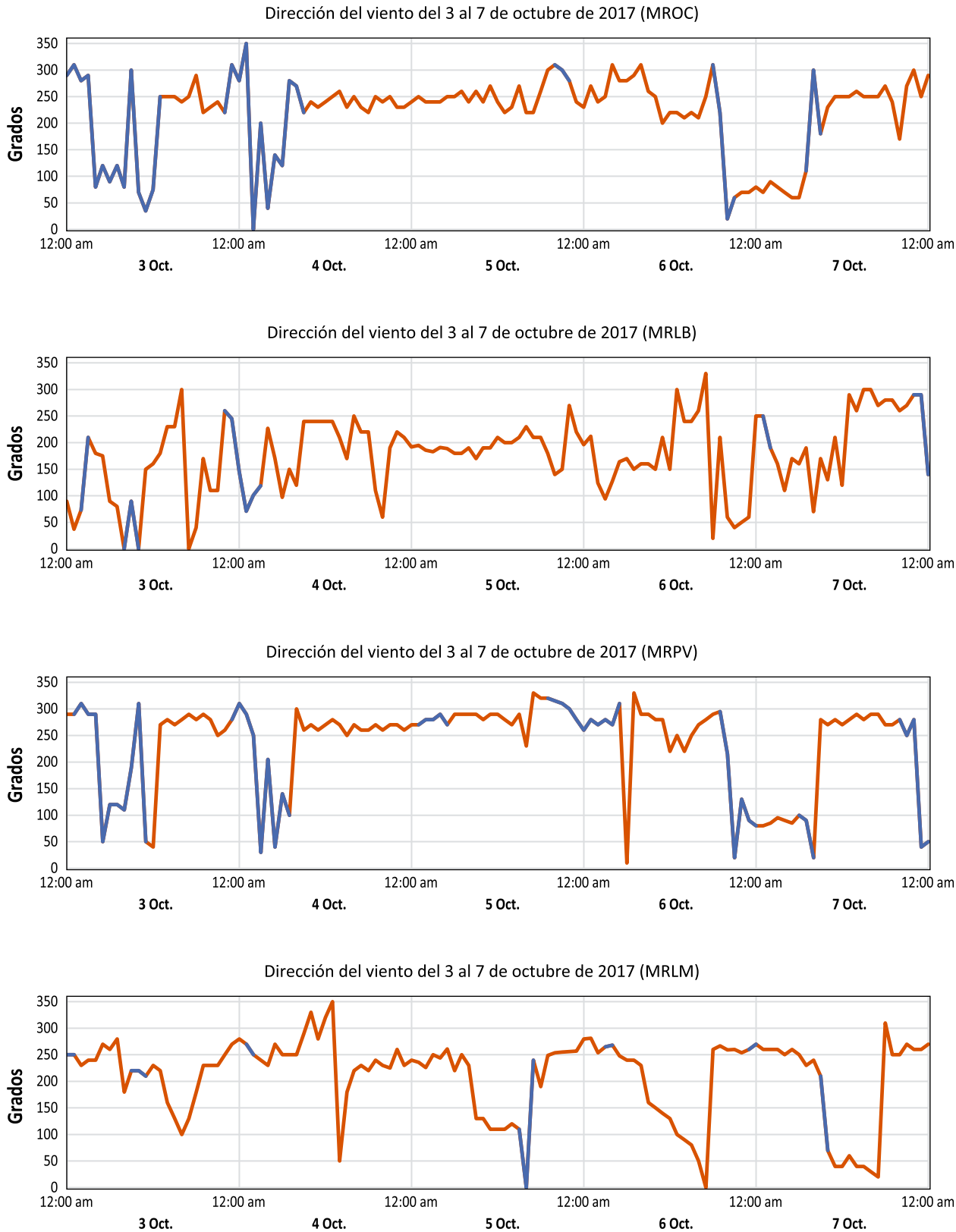


Figura 3. Dirección horaria del viento en los cuatro aeropuertos internacionales del país, para el periodo de afectación del ciclón tropical Nate (trazos celestes: viento variable o débil).

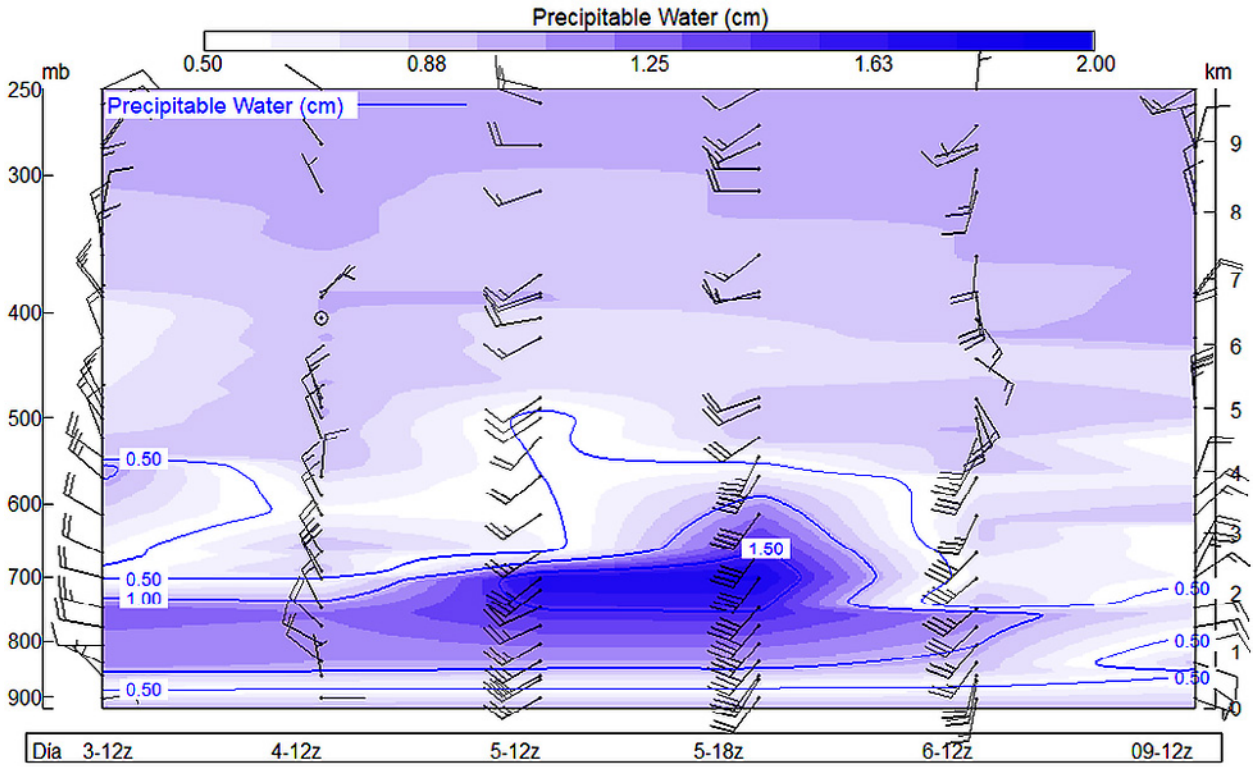


Figura 4. Viento en la vertical (magnitud y dirección) y distribución vertical del agua precipitable, para seis horas fijas en el Valle Central durante el periodo de afectación del ciclón tropical Nate.

a 12 kt. La dirección fue de los 50º en el caso de MRLM, mientras que en el caso de los aeródromos ubicados en el VC y PN su dirección fue consistente entre los 250º y 300º (figura 5). Para este día el sistema pasó al grado de huracán categoría 1.

3.2. Visibilidad

La visibilidad horizontal reinante, es la distancia máxima a la cual se logra reconocer un objeto de dimensiones convenientes, y que se llegue a ese valor por lo menos en la mitad del horizonte o de la superficie del aeródromo (OACI, 2016). La visibilidad en cada uno de los tres aeródromos de la vertiente de Pacífico (MROC, MRLB, MRPV), presenta en promedio sus menores valores (o mayores restricciones) en el mes de octubre, según lo reportado en IMN (2017), IMN (2016) y IMN (2012), respectivamente. Por el contrario, para el Aeropuerto Internacional de Limón (MRLM), octubre es el mes en que los reportes horarios presentan menos restricciones en visibilidad (IMN, 2018).

La figura 6 muestra las variaciones de visibilidad en los cuatro aeropuertos analizados. Se puede notar que las estaciones de MROC y MRPV (ubicadas en el VC) presentaron sus valores inferiores de visibilidad los días cuatro y cinco de octubre, fechas en las que el sistema pasó de ser una depresión tropical a tormenta tropical. Los valores inferiores para estos días fueron de 100 m y 1.000 m en Alajuela, y de 1.500 m y 1.000 m en Pavas.

Por su parte, en el PN las restricciones de visibilidad en la estación de MRLB se presentaron desde el cuatro al seis de octubre, esto marcado por el desplazamiento del sistema hacia el norte de Centroamérica y también el desplazamiento de su afectación hacia sectores más al norte de Costa Rica. Los valores inferiores para estos

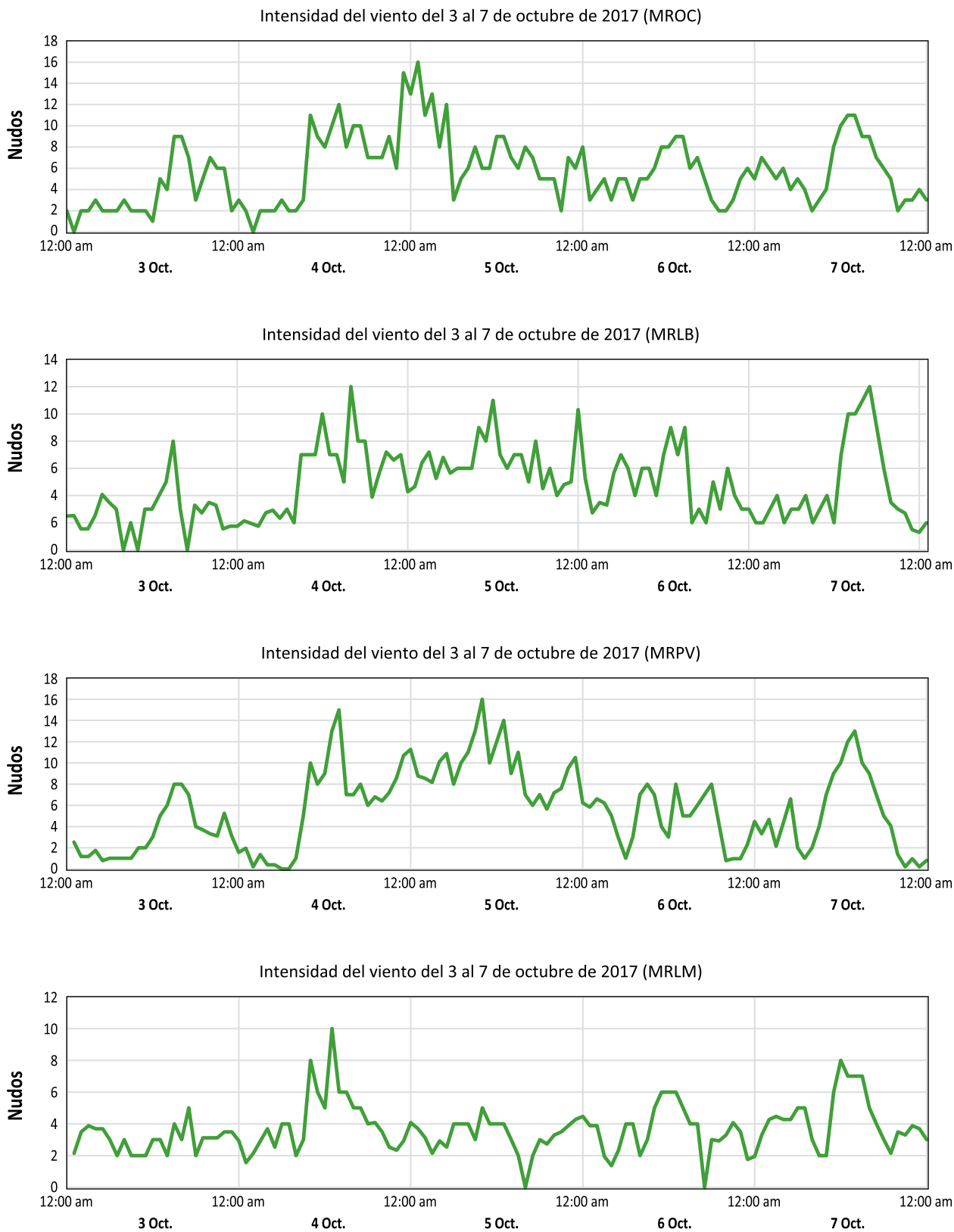


Figura 5. Intensidad horaria del viento en los cuatro aeropuertos internacionales del país, para el periodo de afectación del ciclón tropical Nate.

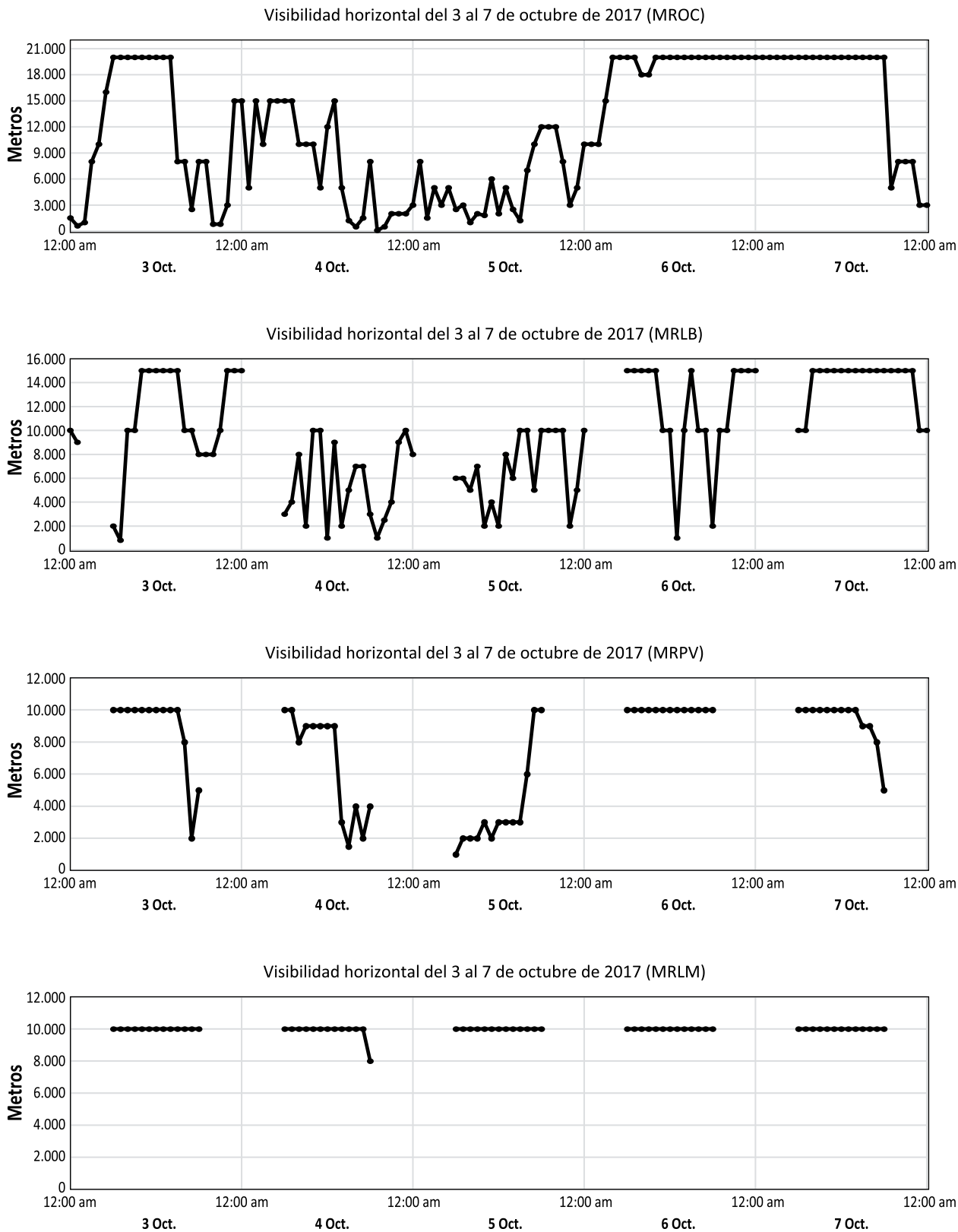


Figura 6. Visibilidad reinante horaria en los cuatro aeropuertos internacionales del país, para el periodo de afectación del ciclón tropical Nate.

días fueron de 1.000 m, 2.000 m y 1.000 m respectivamente (figura 6).

El aeropuerto de la región climática CS (MRLM) no presentó mayores complicaciones con respecto a la visibilidad, se reportó como valor mínimo 8.000 m para el día tres de octubre en horas de la tarde (figura 6).

3.3. Precipitación

El caso de estudio Nate presenta semejanza con los ciclones tropicales Katie (1955), Jenny (1969) y Delia (1973), los cuales acumularon montos de precipitación intensos en el país antes de que fueran considerados tormentas tropicales (Alvarado y Alfaro, 2003). Si bien es cierto el mes de octubre es característico de la época lluviosa en toda la vertiente del Pacífico, los acumulados dejados por el paso de este sistema ciclónico entre el tres al siete de octubre en MROC, MRPV, MRLB y MRLM, de 229,8 mm, 170,8 mm, 452,8 mm y 43,2 mm respectivamente, representan montos significativos en relación con los acumulados mensuales de cada región. En el caso de la estación en el aeropuerto del PN, los valores superaron en 51% el acumulado mensual, para el caso del aeropuerto Juan Santamaría y Tobías Bolaños representaron un 77% y 60% del total mensual respectivamente, mientras que para el de Limón representó un 29% del acumulado total del mes.

La distribución horaria de la precipitación en cada aeródromo se muestra en la figura 7, donde se puede observar cómo los mayores acumulados por hora ocurrieron en MRLB, en el PN del país, el día cuatro de octubre, pasando de lluvias moderadas (RA) a fuertes inclusive (+RA); asimismo esa fue la última región en salir de la influencia del sistema, ya que en estas zonas las lluvias se extendieron hasta el día seis de octubre.

La siguiente estación aeronáutica con acumulados horarios de importancia que se presenta en la figura 7, corresponde al MROC en Alajuela. Los montos mayores se registraron para el cuatro de octubre hacia el final del día, donde se presentaron por varias horas lluvias moderadas (RA), mientras que en horas cercanas a la media noche se registraron fuertes lluvias (+RA). Finalmente, el día cinco de octubre continuaron las lluvias principalmente de intensidad débil (-RA en figura 7).

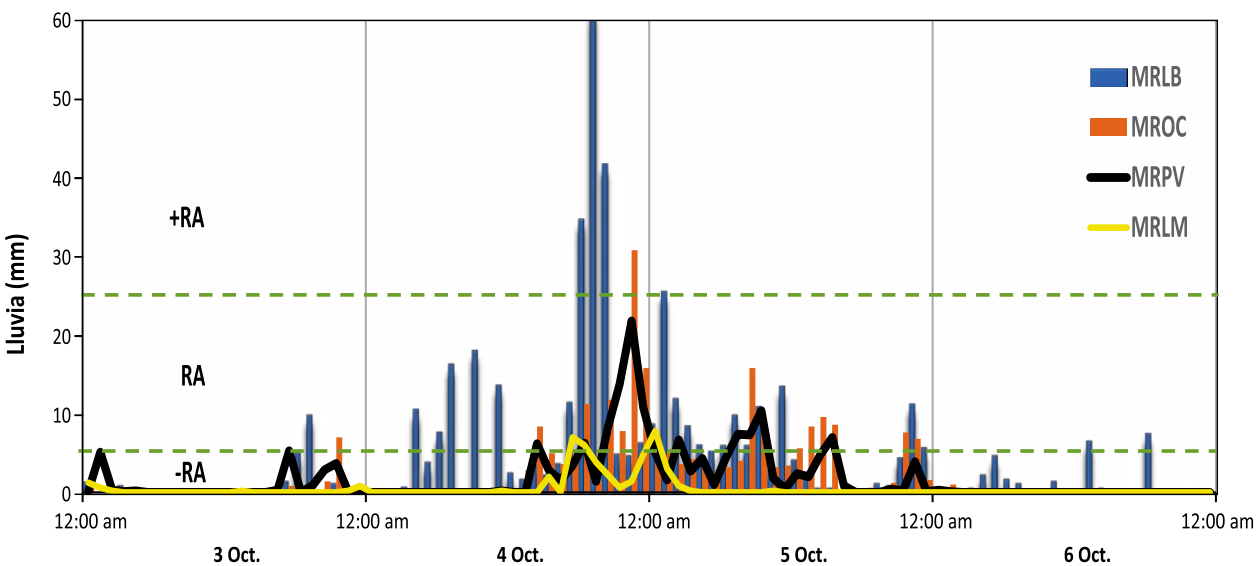


Figura 7. Acumulado horario de precipitación e intensidad de la lluvia reportada en los cuatro aeropuertos internacionales del país, para el periodo de afectación del ciclón tropical Nate.

En el caso de Pavas (MRPV en figura 7), también presentó los principales acumulados entre el cuatro y cinco de octubre, pero con la variante de tener intensidades entre débiles y moderadas (-RA y RA, respectivamente). Semejante a esta última, Limón presentó lluvias hacia horas de la tarde y noche del día cuatro de octubre y en las primeras horas del día cinco de octubre.

Una última característica para las cuatro estaciones aeronáuticas en estudio, es que presentaron lluvias el día tres de octubre, con acumulados horarios inferiores a los 10 mm. Además, para el siete de octubre ninguna de las estaciones registró precipitación (figura 7).

Los días de mayores acumulados de precipitación registrada en los aeródromos de la vertiente del Pacífico representados en la figura 7, concuerdan con los días de mayor cantidad de agua precipitable observada y representada en los contornos de colores de la figura 4, obtenidos de los radio-sondeos meteorológicos.

3.4. Fenómenos de oscurecimiento

Al hablar de fenómenos de oscurecimiento, nos referimos a hidrometeoros en suspensión, los cuales son partículas acuosas suspendidas en la atmósfera. Estas a la vez están relacionadas con los rangos de visibilidad restringida. Dos de estos fenómenos son la neblina y la niebla. La neblina (BR) se reporta cuando la visibilidad se encuentra entre el rango de 5.000 m a 1.000 m, mientras que la niebla (FG) es reportada cuando los rangos de visibilidad son inferiores a 1.000 m (OACI, 2016).

En el mes de octubre, es cuando aumenta la frecuencia de ocurrencia de este tipo de fenómenos de oscurecimiento en toda la vertiente del Pacífico (IMN, 2017; IMN, 2016 y IMN, 2012). La figura 8 muestra las variaciones horarias del tres al siete de octubre, para los aeropuertos MROC, MRLB y MRPV. La mayor ocurrencia de neblina y niebla (BR y FG respectivamente) se presentó en las estaciones aeronáuticas del VC, donde para el aeródromo de Pavas (MRPV, elevación: 997 m) la presencia de niebla se dio desde horas de la tarde hasta horas de la noche del día tres de octubre (la misma alternada con la presencia de neblina). En el caso del aeródromo de Alajuela (MROC, elevación: 890 m), la predominancia de neblinas respecto a las nieblas fue la constante, esto para el primer día de afectación.

Durante el día cuatro de octubre en MROC y MRPV, también predominó la presencia de neblina sobre los pocos casos de niebla, en especial hacia final del día. Al igual que este día, el día cinco de octubre la constante en ambos aeropuertos fue la de ocurrencia de neblina (BR). Se puede observar una clara disminución de la afectación para los días sucesivos al seis y siete de octubre (ver figura 8).

En el aeródromo del Pacífico Norte (MRLB, elevación: 89 m), se registró la presencia de neblina (BR) solo por periodos cortos de tiempo, especialmente en los primeros tres días del evento (figura 8).

3.5. Nubosidad

La nubosidad está muy relacionada con la humedad presente en el ambiente, siendo de especial atención las de capas bajas de la atmósfera, ya que es en esta región cercana a la superficie donde la nubosidad (de importancia para las operaciones aeronáuticas) juega un papel trascendental en las maniobras de despegue y aterrizaje de las aeronaves.

La Organización Meteorológica Mundial en su documento Nº182 (OMM, 1992), define el término techo de nubes como “altura por encima de la superficie terrestre de la base de la capa nubosa más baja y en la que esta rebasa un valor determinado”, esta definición junto con la realizada por la Sociedad Americana de Meteorología (Ceiling, 2012), que indica que esta nubosidad

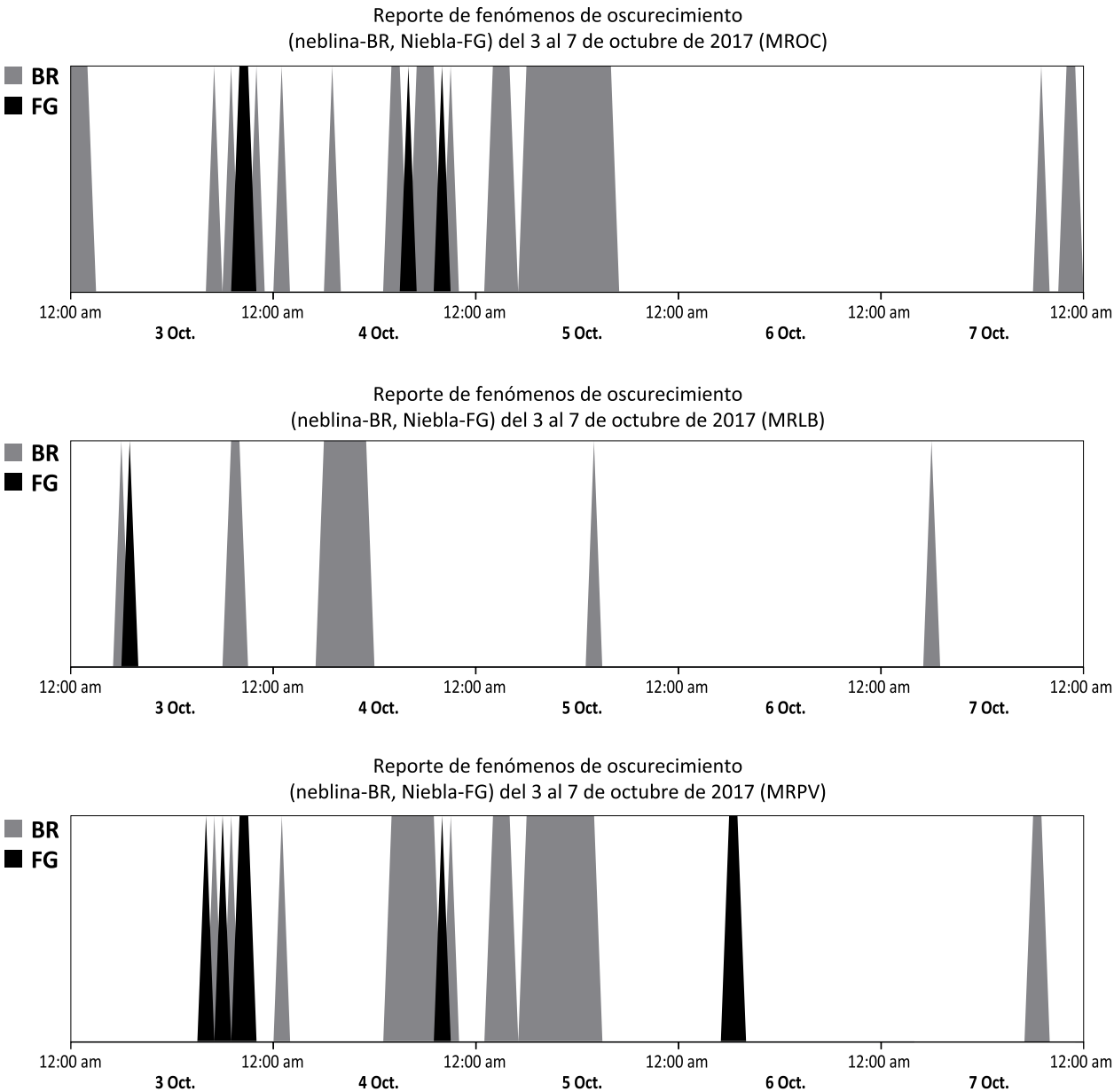


Figura 8. Registro horario de presencia de hidrometeoros en suspensión para tres de los cuatro aeropuertos internacionales del país, para el periodo de afectación del ciclón tropical Nate.

debe ser catalogada con al menos cinco octas[4] de cobertura en el cielo, siendo en otros términos, una nubosidad quebrada (BKN) o un cubierto de nubes (OVC). La figura 9 muestra las variaciones y la presencia de este fenómeno, además del rango de alturas a las que se encontraba el mismo, ya sea como nubes bajas (N_{Baja}), nubes medias (N_{Med}) o como nubes altas (N_{Alta}) durante la influencia del ciclón tropical Nate.

Los techos de nubosidad baja inferiores a los 5.000 ft (pies)[5] predominaron e iniciaron su presencia en los aeródromos de la vertiente del Pacífico (MROC, MRLB y MRPV), para horas finales del día tres de

4 Octavos de cielo.

5 1 ft = 0.3048 m.

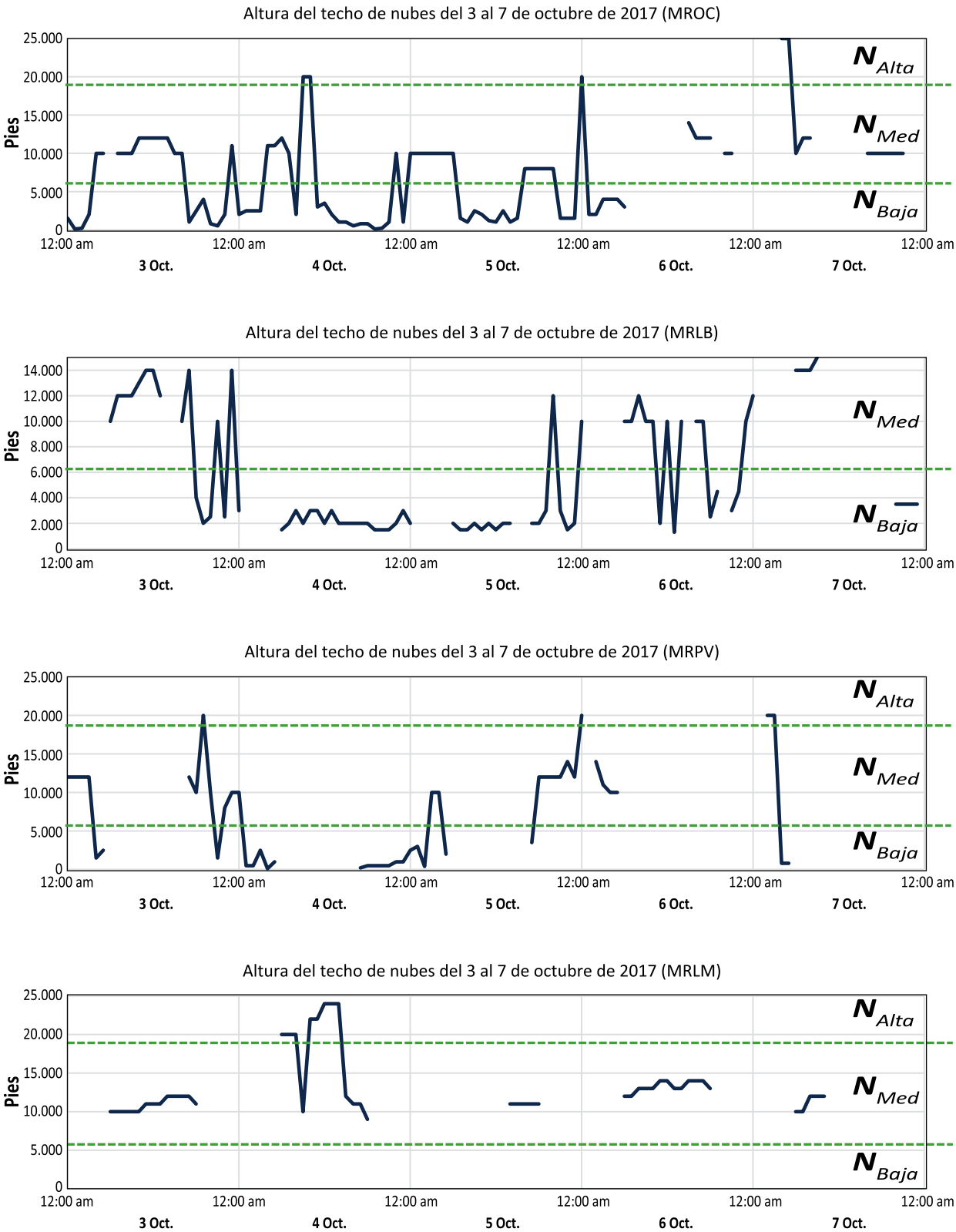


Figura 9. Registro horario de presencia techo de nubes en los cuatro aeropuertos internacionales del país, para el periodo de afectación del ciclón tropical Nate (N_{Baja}: Nubes bajas, N_{Med}: Nubes medias, N_{Alta}: Nubes altas).

octubre y de forma notaria para los días cuatro y cinco de octubre; esto con la particularidad de que para el día seis de octubre, y solo para MRLB en el PN, los techos nubosos se presentaron de manera temporal. En el caso del aeropuerto de Limón (MRLM), solo ocurrió la presencia de techos de nubosidad entre media y alta, con alturas de los 10.000 ft a 25.000 ft (figura 9).

La climatología de los tres diferentes aeropuertos de la vertiente del Pacífico, tiene registrada la mayor cantidad de ocurrencia de techos de nubosidad baja para este mes de octubre en la época lluviosa, con una predominancia de ocurrencia hacia horas de la tarde y noche (IMN, 2017; IMN, 2016 y IMN, 2012). A diferencia de esto, los presentados en la figura 9 (días tres y cuatro de octubre principalmente), mostraron una clara tendencia de ocurrencia durante la mayor parte del día.

3.6. Temperaturas

Las temperaturas a lo largo del día por lo general denotan un claro ciclo diurno. De este se conoce que las temperaturas mínimas se presentan normalmente en horas de la madrugada, mientras que las temperaturas máximas se registran entre el medio día y media tarde (Oliver, 2005). Con respecto a las temperaturas de punto de rocío, las cuales involucran indirectamente el grado de humedad presente en la atmósfera, en promedio se observan comportamientos semejantes a los de temperatura ambiente, o sea, los valores inferiores de punto de rocío son reportados para las madrugadas, mientras que los valores mayores se presentan durante horas del día, en especial cuando las brisas húmedas marítimas alcanzan las estaciones en los aeródromos analizados (Manso y Vargas, 1990).

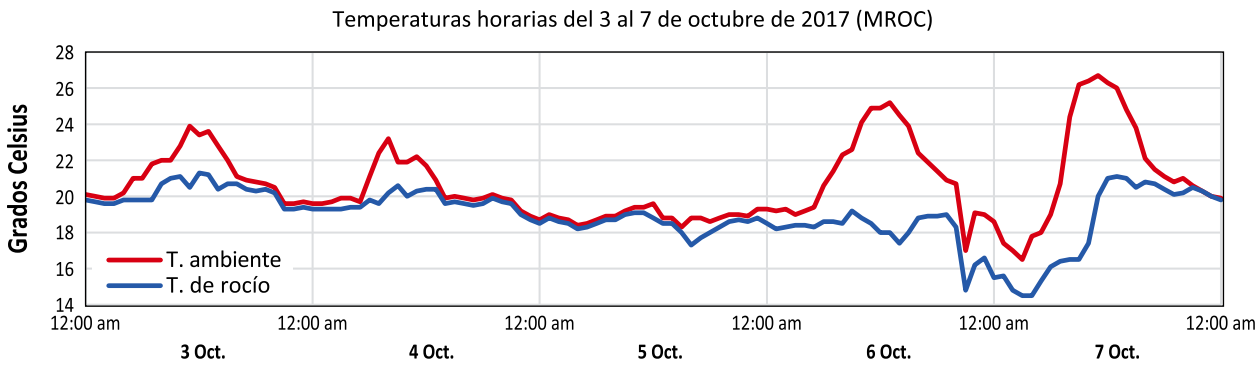
La figura 10 muestra las variaciones de las temperaturas, en las cuales se puede apreciar un marcado ciclo diurno en la estación de MRLM, ubicada en el Caribe Sur. Para el caso de MROC, MRPV y MRLB, el ciclo diurno fue más evidente para el primer día (tres de octubre) y para los dos últimos (seis y siete de octubre). Dichas estaciones se encuentran ubicadas dos en la zona climática VC y una en el PN.

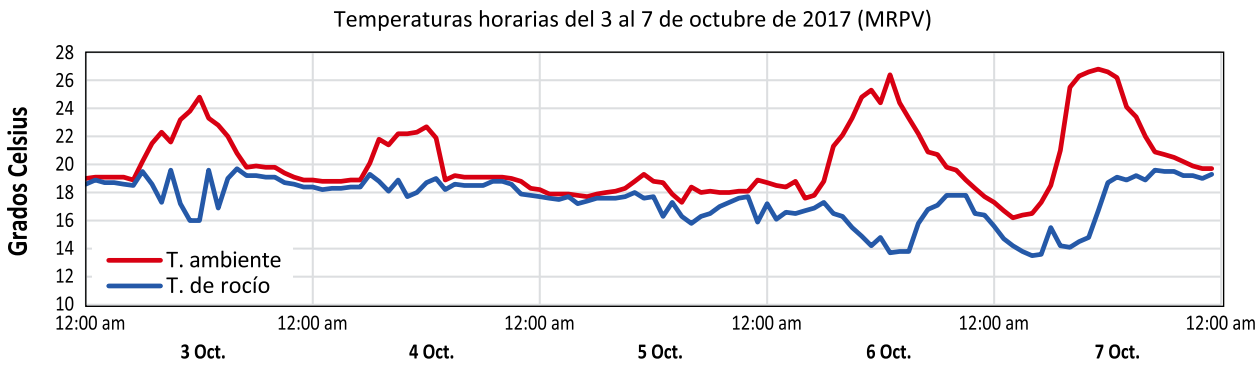
Con respecto a los días cuatro y cinco de octubre, las condiciones de temperaturas más bajas de lo normal propiciaron que se rompiera este ciclo, ya que los valores máximos de estos días para Alajuela fueron de 23,2ºC y 19,6ºC, en Pavas de 22,7ºC y 19,3ºC y en Liberia de 24,8ºC y 23,9ºC respectivamente. Por otro lado, también se observa para estos dos días de mayor afectación por parte del ciclón tropical, unas condiciones de saturación máximas, ya que la advección de humedad estrechó la depresión de punto de rocío, registrando valores casi iguales entre ambas temperaturas (figura 10).

4. DISCUSIÓN

Durante el periodo de cinco días incluidos en este estudio, el ciclón tropical presentó variaciones en intensidad (presión central, vientos máximos) y posición a lo largo de su desplazamiento. Dado que la ubicación de un sistema sinóptico como el analizado cambia en el tiempo, así también varían las implicaciones o condiciones meteorológicas que este desarrolla. Por ello en el cuadro 2 se presenta la ubicación, la presión central y los vientos máximos promedio para los días analizados, en especial los días de mayor influencia sobre el territorio costarricense.

Considerando los días cuatro y cinco de octubre como los de mayor influencia del ciclón, se deduce con el análisis anterior que, las direcciones del viento predominaron desde los 200º a los 300º en los tres aeródromos de la vertiente del Pacífico, con magnitudes que aumentaron el doble con respecto al promedio para ambos días, y con relación a las existentes los días anteriores. La presencia de restricciones de visibilidad cada vez





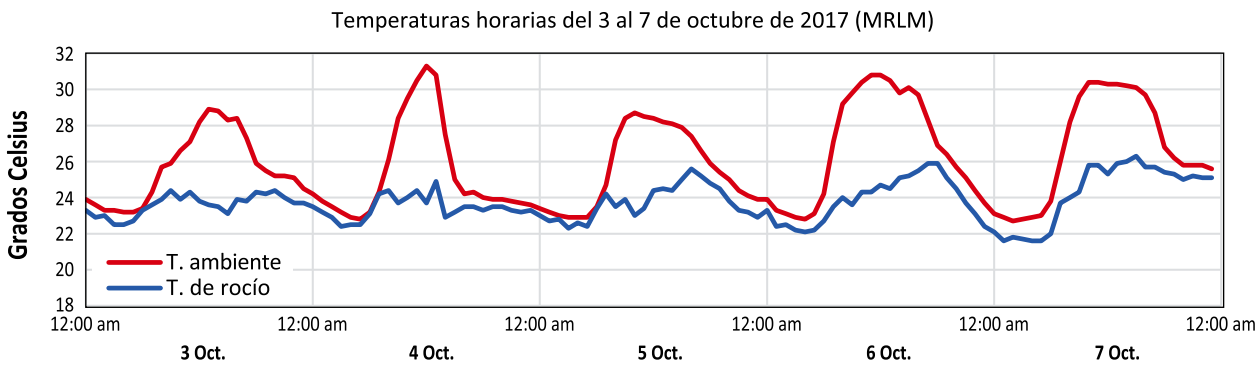


Figura 10. Registro horario de la temperatura ambiente y del punto de rocío, en los cuatro aeropuertos internacionales del país, para el periodo de afectación del ciclón tropical Nate.

Cuadro 2. Características promedio del ciclón tropical durante los cinco días de afectación

Día	Estado del CT	Ubicación Lat. / Long.	Presión Central Promedio	Viento Máx. Promedio
03 – Oct	Baja Presión	11.2º/81.1º	1007.5 hPa	25 kt
04 – Oct	Depresión Tropical	12.2º/82.3º	1004.5 hPa	30 kt
05 – Oct	Tormenta Tropical	14.2º/83.8º	998.5 hPa	35 kt
06 – Oct	Tormenta Tropical	18.8º/85.1º	995.0 hPa	48 kt
07 – Oct	Huracán	25.6º/87.8º	984.2 hPa	76.7 kt

Fuente: Adaptado de NHC, Tropical Cyclone Report Hurricane Nate.

más frecuentes (por ejemplo, inferiores a los 5.000 m), va de la mano con la ocurrencia de tiempos presentes como es el caso de lluvia de variable intensidad, alternada con hidrometeoros en suspensión como es el caso de neblinas y nieblas.

Los principales cambios en la nubosidad se producen al pasar de techos de nubes medias (principalmente de altoestratos y nimbostratos), a techos nubosos bajos inferiores a una altura de 5.000 ft (generalmente de estratos y estratocúmulos). La presencia de cielos nublados para este tipo fenómeno genera poca radiación solar incidente en superficie, y por ende, una disminución en el calentamiento diurno sumado a la presencia de lluvias a lo largo de todo el día. Esto provoca un descenso en las temperaturas máximas y la saturación excesiva de la atmósfera superficial durante todo el día.

Todas estas características se encuentran dentro de la definición del término condición meteorológica de temporal.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El ciclón tropical Nate se considera como un evento hidrometeorológico extremo para Costa Rica, esto debido a las implicaciones que presentó en diferentes campos como el económico, el social y el ambiental.

Al considerar la mayor influencia que generó el sistema ciclónico Nate, se debe decir que es en la región RIC-1 donde se percibieron más fuertemente sus efectos y en especial hacia los aeródromos de la vertiente del Pacífico. De acuerdo con esto, las variables aeronáuticas presentaron las siguientes características: la dirección del viento predominante era del suroeste y oeste con intensidades variables entre los 8 y 16 nudos.

Se percibieron visibilidades horizontales inferiores a los 5.000 metros, además de la presencia de tiempos presentes como lluvias entre débiles a fuertes, con ocurrencia alterna de neblinas y nieblas.

Además, se produjo un aumento de la cobertura nubosa, así como una disminución de la altura a la que se presenta; es decir, se pasó de techos de nubosidad media a techos nubosos bajos inferiores a los 5.000 pies.

Las temperaturas máximas descendieron por debajo de lo normal entre 4º a 8ºC, mientras que las temperaturas medias se registraron entre 2º a 4ºC bajo lo normal.

Las condiciones meteorológicas anteriores, no representan una generalidad para cualquier otro ciclón tropical ubicado en las diferentes

regiones de influencia ciclónica (RIC), ya que en cada caso particular intervienen factores propios del ciclón tropical como son: fuerza, intensidad, velocidad de traslación y ubicación. Por otro lado, las condiciones hidrológicas previas en las que se encuentre el país y las regiones geográficas vulnerables con probabilidad de ser afectadas, también repercuten en el grado de afectación de cada evento hidrometeorológico en particular.

Se sugiere realizar investigaciones sobre la influencia de otros ciclones tropicales como el estudiados, para poder hacer una comparación de variables, así como de la homogenización de los efectos que los mismos presentan en el país.

Es necesario también investigar y relacionar estadísticamente, las implicaciones económicas que los eventos hidrometeorológicos como el analizado en este estudio generan. El conocer cómo se impactan las operaciones aeroportuarias (fluidez y continuidad), tendrá como resultado el poder cuantificar y establecer escenarios para futuras afectaciones.

6. AGRADECIMIENTOS

Se le agradece al Departamento de Información por la ayuda prestada en la búsqueda de los datos e incentivar la pronta reparación de algunas series de tiempo que debieron recuperarse. Se le agradece al compañero Alejandro Meza Mayorga por las ideas en el diseño de algunos gráficos.

7. REFERENCIAS

Alfaro, L. F. y Alfaro, E. (2003). Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos.* 10 (1) 1-11.

Beven, J. L. & Berg, R. (2018). *Tropical Cyclone Report: Hurricane Nate. 4-8 October, 2017.* National Hurricane Center. Florida, USA.

Ceiling. (2012). *En Meteorology Glossary, American Meteorological Society*. Recuperado de: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page

Climate Prediction Center. (2017). *NOAA 2017-Atlantic Hurricane Season Outlook. 23 JULIO 2018.* Climate Prediction Center Internet Team. Recuperado de: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/archives/hurricane2017/August/

Instituto Meteorológico Nacional-Comité Regional de Recursos Hidráulicos. (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático.* MINAET, IMN, CRRH. San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional. (2012). *Climatología aeronáutica. Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma*. IMN-MINAE. Recuperado de: https://n9.cl/thbz.

Instituto Meteorológico Nacional. (2016). *Climatología aeronáutica. Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós*. IMN-MINAE. Recuperado de: https://n9.cl/3kja.

Instituto Meteorológico Nacional. (2017). *Climatología aeronáutica. Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.* IMN-MINAE. Recuperado de: https://goo.gl/dk59RX.

Instituto Meteorológico Nacional. (2018). *Climatología aeronáutica. Aeropuerto Internacional de Limón.* IMN-MINAE. Recuperado de: https://n9.cl/346i .

Manso, S. P. y Vargas, V. A. (1990). Climatología aeronáutica en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 1-16.

Murakami, H., Hsu, P.-C., Arakawa, O. & Li, T. (2014). Influences of model biases on projected future changes in tropical cyclone frequency of occurrence. *Journal Climate*, 27, 2159–2181.

National Hurricane Center. (2017). *Monthly Tropical Weather Summary,* Dec-1-2017. Miami FL.

Organización de Aviación Civil Internacional. (2016). *Anexo 3 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional.* 19 ed. Montreal, Canadá. OACI.

Oliver, J.E. (2005). *Encyclopedia of World Climatology.* The Netherlands: Springer.

Organización Meteorológica Mundial. (1992). Vocabulario Meteorológico Internacional *BMO*- No.182. Ginebra, Suiza.

Papin, Philippe P., Bosart, L. F., & Torn, R. D. (2017). Climatology of Central American Gyres. *Monthly Weather Review*. 145, 1983-2009.

Song, J., Klotzbach, P., Tang, J. & Wang, Y. (2018). The increasing variability of tropical cyclone lifetime maximum intensity. *Scientific Reports,* 8:16641. DOI:10.1038/s41598-018-35131-x

Valverde, J. P. (2017). Importancia de la interpretación e implementación de las regulaciones y procedimientos meteorológicos para la aviación internacional. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 16 (2) 19-27.

Análisis estadístico, temporal y espectral de datos meteorológicos de la región de San Ramón, Alajuela

EDUARDO ARIAS NAVARRO [1]
MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ VARGAS [2]

Resumen

En el presente estudio analizan los datos de series temporales suministradas por las bases de datos de la estación meteorológica de San Ramón (EMSO), en el periodo 2009-2016 y de la estación meteorológica del Hotel Villa Blanca (EMHVB), en el periodo 2015-2017, con el objetivo de identificar una señal climática mediante la tendencia central de datos en la región de occidente, específicamente del cantón de San Ramón, Alajuela. Para ello, se emplearon estudios estadísticos, análisis temporal o exploratorio y procesos estocásticos de tipo espectral. El estudio se aplicó a diferentes variables físicas como la temperatura, el viento, la precipitación y la humedad relativa, estableciendo los aspectos de mayor relevancia para comprender el comportamiento climatológico de la región.

PALABRAS CLAVES: CLIMATOLOGÍA, ESTADÍSTICA, ESPECTRAL, SERIES TEMPORALES, ESTACIÓN METEOROLÓGICA.

Abstract

With this article we intend to analyze data from time series provided by the databases of the San Ramón Meteorological Station (EMSO) in the period 2009-2016 and the Meteorological Station of the Hotel Villa Blanca (EMHVB) in the period 2015-2017, with the objective of identifying a climatic signal by means of the central tendency of data in the region of the west itself, the canton of San Ramón, Alajuela. The use of statistical studies, temporal analysis and spectral analysis is shown in this work. The study was applied to different physical variables such as temperature, wind, precipitation and relative humidity, establishing the most relevant aspects for understanding the climatological behavior of the region.

KEY WORDS: CLIMATOLOGY, STATISTICS, SPECTRAL, TIME SERIES, WEATHER STATION.

1. INTRODUCCIÓN

San Ramón es el segundo cantón de la provincia de Alajuela. Cuenta una superficie de unos 1.018,64 km^2. Está ubicado hacia el noroeste del país, a unos 65 km de San José la capital de Costa Rica (UCR, 2012). Esta región es caracterizada como una zona voluble afectada por una climatología mixta, proveniente de la zona de Confluencia Intertropical del Pacífico (CIP) y la zona del Caribe (Solano y Villalobos, 2015).

Solano y Villalobos (2015) clasifican a esta zona como parte del Valle Central Occidental, donde se presentan dos estaciones bien marcadas, la estación lluviosa y la estación seca, esta última con una duración aproximada de cinco meses. Es una zona de bosque húmedo subtropical, con temperaturas medias que oscilan los 22 °C y precipitaciones anuales de 1.950 mm.

Con la finalidad de entender y justificar la tendencia del periodo de análisis en la zona

1 Licdo. en Enseñanza de la Física. Sección de Física. Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: eduardo.arias_n@ucr.ac.cr

2 Licdo. en Ingeniería Industrial. Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: miguel.jimenezvargas@ucr.ac.cr

de San Ramón, se llevó a cabo el desarrollo de técnicas de análisis en series meteorológicas en el dominio temporal y espectral (Rodríguez y Llasat, 1997).

Por consiguiente, el objetivo del presente estudio fue la identificación de posibles señales climáticas en la región de San Ramón, mediante la aplicación de una metodología para el análisis temporal o exploratorio y espectral a series seculares de temperatura, precipitación, humedad y viento; utilizando la estación meteorológica de la Sede de Occidente (EMSO) y la estación meteorológica del Hotel Villa Blanca (EMHVB), a fin de determinar cambios o tendencias climatológicamente relevantes que hayan repercutido en la variabilidad climática durante el periodo de tiempo analizado.

2. MATERIALES Y DATOS

2.1. Instalación experimental

La estación meteorológica de la Sede de Occidente (EMSO), se ubica en el campus universitario Sede de Occidente de la Universidad de Costa Rica, en las coordenadas 10° 05´ 12.20´´N y 84° 28´43.38´´O, a 1.073 metros de altura sobre el nivel del mar, emplazada y asistida por el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica[3] (CIGEFI, 2018).

La estación meteorológica mencionada, es un equipo de la marca Campbell® Scientific que cuenta con sensores como el anemómetro integrado con una veleta, una sonda de temperatura y humedad relativa similar al modelo CS500, un pluviómetro modelo Texas Electronics-525M y un registrador de datos similar al CR10MX. Las mediciones registradas se realizan periódicamente por medio de un controlador que integra una media aritmética cada hora, y posteriormente la información puede ser descargada a un computador.

De esta forma, la EMSO puede generar de manera horaria un reporte de datos con los sensores conectados, estableciendo para este estudio una base de datos que contiene información desde el 24 de febrero del año 2009 a las 17:00 horas, hasta el 13 de marzo del 2017 a las 15:00 de la hora local (GMT-6). En el caso de la precipitación, los datos dejaron de registrarse a partir del 31 de agosto del año 2016, a las 18:00 hora local. Para el estudio de las variables climáticas, se utilizaron las siguientes unidades de medida: la temperatura en grados celsius, la precipitación en milímetros de agua precipitada por hora, lo que equivale a un litro de agua por metro cuadrado, la velocidad del viento en metros por segundo y su dirección predominante en grados; además, la humedad relativa representa un valor porcentual de cantidad de vapor de agua que contiene el aire.

Por otra parte, la estación meteorológica del Hotel Villa Blanca (EMHVB) se encuentra ubicada en la zona montañosa de los Ángeles de San Ramón, en las coordenadas 10° 12´ 10.14´´N y 84° 29´02.22´´O, a una elevación de 1.125 metros sobre el nivel de mar, y está bajo la supervisión del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica[4] (IMN, 2018).

La estación EMHVB cuenta con sensores para medir viento, temperatura, precipitación y humedad, utilizando los mismos estándares de medición que la EMSO y generando un reporte diario que para este estudio abarcó el análisis de datos del periodo comprendido entre el 14 de mayo del 2015 a la hora 1:00 y el 20 de agosto del 2017 a las 24:00 hora local (GMT-6). Para el caso de la precipitación, los registros contemplaron hasta el día 17 de julio del 2017 a las 24 horas.

3 Si desea consultar más información de esta estación en tiempo real diríjase al siguiente enlace: http://tooji.cigefi.ucr.ac.cr/wlinksr/Current_Vantage_Pro.htm

4 Si desea consultar más información de esta estación en tiempo real diríjase al siguiente enlace: https://www.imn.ac.cr/especial/estacionvblanca.html

2.2. Tratamiento de los datos

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, los datos de estudio climatológico son "…más útiles cuando se han editado, sometido a un control de calidad y almacenado en un archivo…" (OMM, 2011). En el cuadro 1 se presentan una serie de datos atípicos, que debieron ser extraídos para disponer de mayor homogeneidad en los datos y disminuir los sesgos estadísticos, ya que son errores que suelen aparecer porque:

> *"… pueden surgir principalmente como resultado de errores atribuibles a los instrumentos, al observador o a los procesos de transmisión de datos, la introducción de datos mediante teclado y su validación, así como a la modificación de los formatos de datos y los problemas que implica resumirlos" (OMM, 2011).*

De esta forma, al depurar las bases de datos, los análisis estadísticos procesados tanto en datos numéricos como del tipo gráfico garantizan mayores grados de confianza.

3. METODOLOGÍA

3.1. Estadística descriptiva

Las series temporales analizadas corresponden a las siguientes variables: viento (**V**), precipitación (**P**), humedad relativa (**H.R**), y temperatura media anual, máxima y mínima (**T**). No obstante, los parámetros de medición pueden variar de una variable a otra, por tanto, en el cuadro 2 se presentan las muestras detalladas por tamaño de la muestra (N), el valor promedio ($\bar{x}$), su respectiva desviación estándar (σ) y la variabilidad entre los valores extremos de máximos y mínimos. Con este resumen de resultados, se puede establecer

Cuadro 1. Datos atípicos en la base de datos de la EMSO

Estación EMSO			
Elemento climático	**Periodo inicial**	**Periodo final**	**Observaciones**
Precipitación (P)	[24/2/2009 17:00]	[06/6/2009 11:00]	No se tiene registro de los datos, la base identificó los espacios con "/N".
	[3/5/2011 9:00]	[15/5/2011 7:00]	No hubo registros de datos, la base identificó espacios vacíos.
	[16/5/2014 12:00]	[4/6/2014 7:00]	No hubo registros de datos, la base identificó espacios vacíos.
	[1/9/2016 22:00]	[13/3/2017 15:00]	El sensor solo registró en ese periodo valores de "0" siendo atípico por estar en estación lluviosa, incluyendo el Huracán Otto.
Temperatura (T)	[3/5/2011 9:00]	[15/5/2011 7:00]	No hubo registros de datos, la base identificó espacios vacíos.
	[16/5/2014 12:00]	[4/6/2014 7:00]	
	[17/1/2015 13:00]	[22/1/2015 15:00]	
Viento (V)	[3/5/2011 9:00]	[15/5/2011 7:00]	No hubo registros de datos, la base identificó espacios vacíos.
	[16/5/2014 12:00]	[4/6/2014 7:00]	
Humedad Relativa (H.R)	[3/5/2011 9:00]	[15/5/2011 7:00]	No hubo registros de datos, la base identificó espacios vacíos.
	[16/5/2014 12:00]	[4/6/2014 7:00]	
	[17/1/2015 13:00]	[22/1/2015 15:00]	

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2. Descripción comparativa de las series mediante el tamaño de muestra, promedio, desviación estándar y valores extremos (máximos y mínimos)

	Estación EMSO								Estación EMHVB							
	Época seca				*Época lluviosa*				*Época seca*				*Época lluviosa*			
	T $[^oC]$	P $[\frac{mL}{m^2}]$	H.R $[\%]$	V $[\frac{m}{s}]$	T $[^oC]$	P $[\frac{mL}{m^2}]$	H.R $[\%]$	V $[\frac{m}{s}]$	T $[^oC]$	P $[\frac{mL}{m^2}]$	H.R $[\%]$	V $[\frac{m}{s}]$	T $[^oC]$	P $[\frac{mL}{m^2}]$	H.R $[\%]$	V $[\frac{m}{s}]$
N	23.373	21.928	23.373	23.495	46.304	45.428	46.304	46.304	5.693	5.736	5.731	5.737	13.425	11.071	13.518	13.756
$\bar{x}$	20,01	0,01	80,14	3,28	20,85	0,27	84,07	1,78	18,82	0,05	95,10	2,51	19,51	0,18	98,41	1,78
σ	3,69	0,34	12,06	1,66	2,70	1,68	8,39	1,55	2,47	0,34	9,70	1,25	1,53	1,09	4,41	0,91
Min	10.00	0	21,1	0	8,4	0	31,5	0	12	0	42	0,1	14,5	0	56	0
$Máx$	32,44	20,7	100	9,9	30,6	46	100	8,96	27,9	14,4	100	9,6	27,8	36,2	100	6,7

Fuente: Elaboración propia.

con mayor certeza la variabilidad estadística o relación directa que puede existir de una estación a otra, o de un periodo a otro.

Además de contar con los parámetros estadísticos mencionados, dentro de la categoría se destaca el modelo del gráfico de la rosa de los vientos, este modelo en forma circular permite subdividir en 16 o más partes el sector circular, con el fin de estudiar la dirección del viento, de igual forma, permite reportar la intensidad del viento por distribuciones porcentuales y la velocidad del viento de forma clasificada por intervalos, siendo un modelo preciso para comprender simultáneamente la dirección y magnitud del viento.

3.2. Series temporales

Este estudio temporal, abarca la caracterización de los estadísticos de las series y sus respectivas evoluciones temporales (Rodriguez y Llasat, 1997). Se consideró realizar el análisis estadístico, a través de un estudio detallado con las tendencias significativas de los datos mensuales para ambas estaciones, empleando diferentes métodos como son los gráficos de cajas para temperaturas medias, histogramas con valores de precipitaciones acumuladas, de contornos a todas las variables climáticas y de tendencia móvil en variables de importancia. En la figura 1 se detallan las tendencias de las series temporales de: a) la estación EMSO y b) la estación EMHVB, durante los periodos analizados.

3.3. Estadística espectral

El proceso estadístico espectral, entendido a partir de una suma de sucesiones periódicas, admite mediante el método de la transformada de Fourier (FFT) el cálculo de espectros de potencia, lo que propicia una detallada exploración en las zonas de baja frecuencia y permite representar máximos sin significación real o desplazamientos frecuenciales de poco estudio, y centrar su análisis en las amplitudes esperadas sobre máximos espectrales de la señal periódica determinada y marcada por el denominado máximo frecuencial (Rodríguez y Llasat, 1997).

La exploración de datos en estas series temporales meteorológicas se desarrolló con periodogramas,

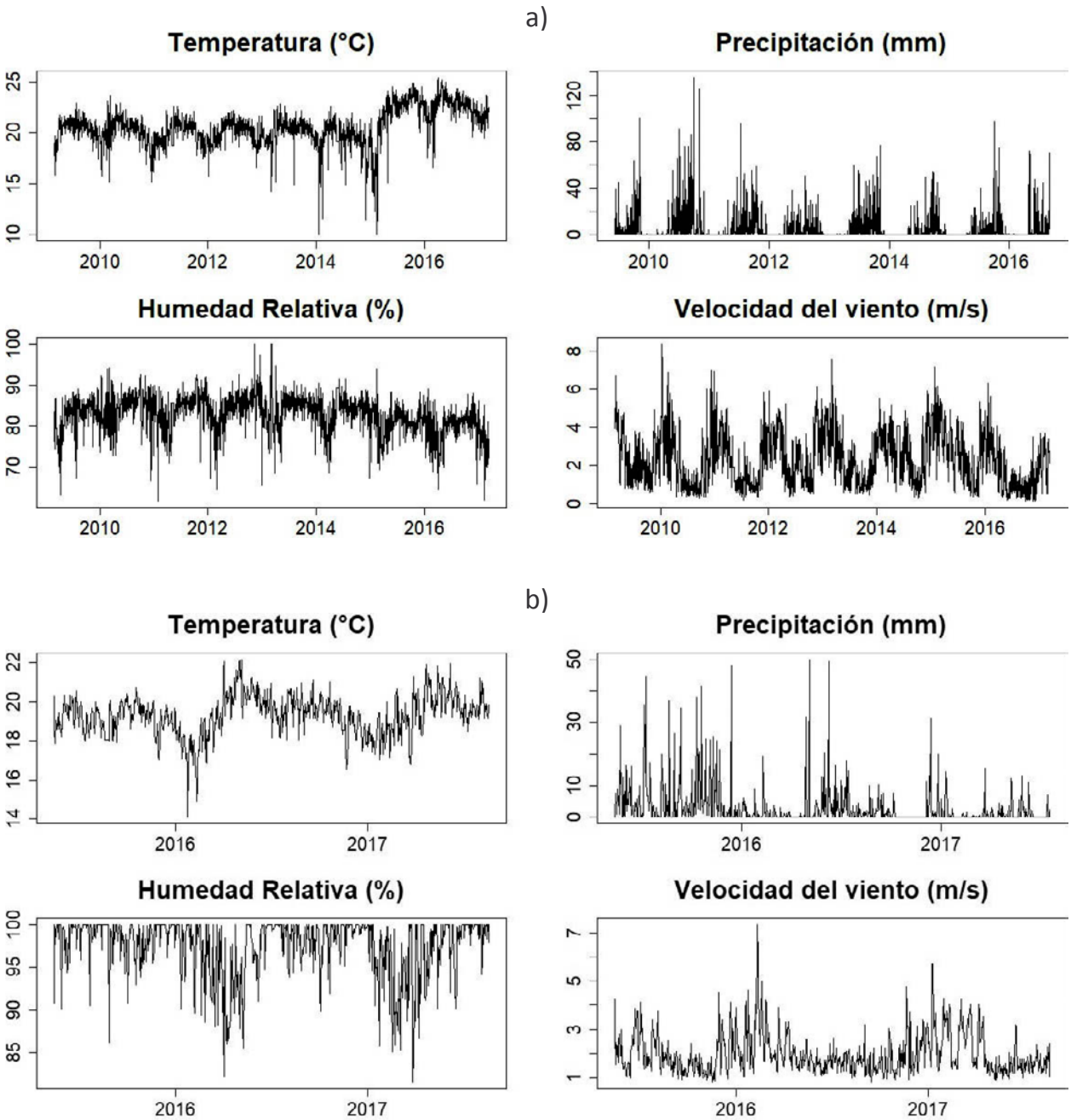


Figura 1. Comportamiento de series temporales para a) estación EMSO y b) estación EMHVB, durante el periodo de estudio analizado.

siendo una herramienta de estimación de densidad espectral para la obtención de máximos significativos, para esto se restringió por anchos de banda con estándares bajos que permiten mayor sensibilidad en las series de cada variable calculada y una mayor significancia en los espectros o frecuencias de interés. Las figuras 9 y 10 describen el comportamiento estacional de la temperatura, el viento, la precipitación y la humedad, en la EMSO y el EMHVB, donde se resaltaron los máximos de análisis para cada espectro.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Temperatura

En la figura 2 se representan las condiciones anuales de la temperatura en 2.a) la estación EMSO y 2.b) la estación EMHVB; para este caso se utilizó el gráfico de cajas, ya que este permite una mejor comparación de los valores medios (Walpole et al., 2012), se consideraron cuantiles para las series de temperatura media anual, máxima y mínima. De lo anterior se obtuvo, que la EMSO reportó una media anual de 20,57 °C, mientras que la EMHVB reportó un valor de 19,30 °C; una media de temperatura máxima en la EMSO de 24,85 °C y en la EMHVB de 21,83 °C. Por último, se obtuvo una media anual de 17,74 °C para la EMSO y de 17,43 °C para la EMHVB en la temperatura mínima. La amplitud térmica varió considerablemente de una estación a otra, siendo de 7,11 °C para la EMSO y de 4,40 °C en la EMHVB.

Es notorio, que a pesar de que la EMSO tiene una muestra mayormente significativa por mayor cantidad de datos (ver cuadro 2), ambas estaciones registran medias con tendencias y comportamientos muy similares entre sí, además el gráfico de cajas excluye aquellos valores aislados o atípicos y se representan en sus extensiones como bigotes, ya que no concuerdan con los pronósticos esperados de temperatura en la zona, lo que aporta mayores grados de confianza en el valor reportado.

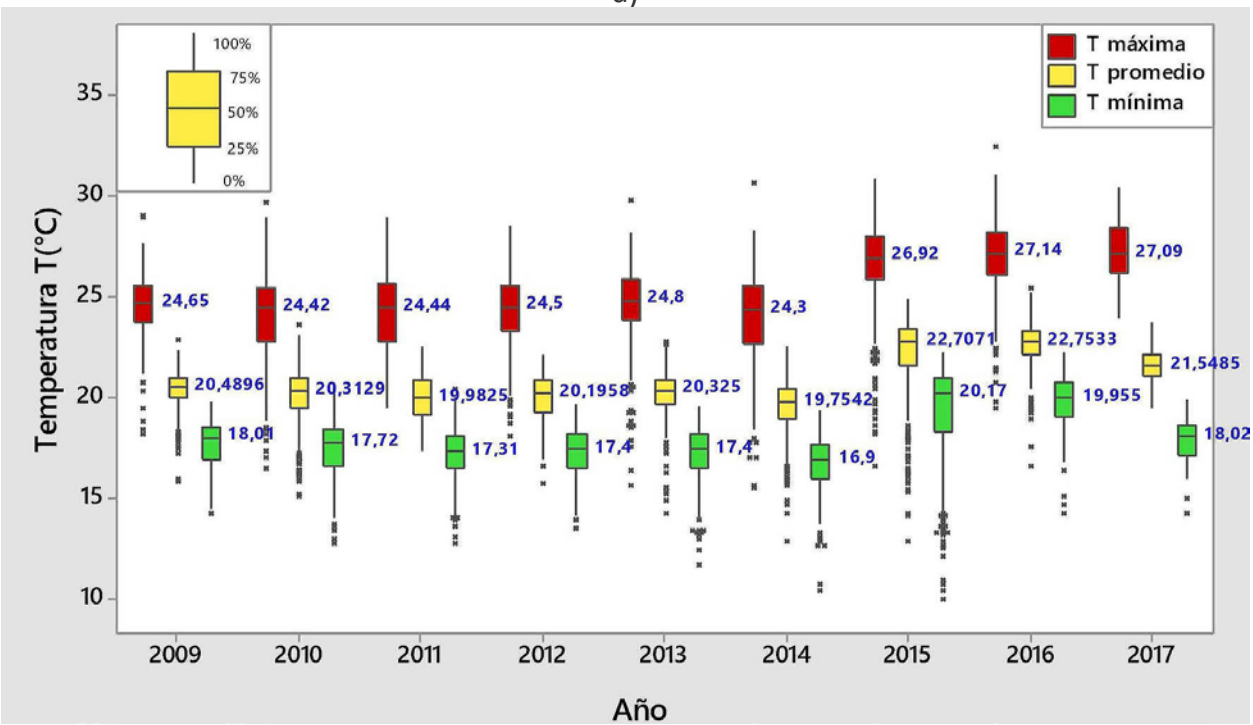
De acuerdo con Serrano, Zuleta, Moscoso, Jacome, Palacios y Villacís (2012), la temperatura es considerada como la única variable meteorológica que tiene una relación lineal con la altitud, siendo que a mayor altitud la temperatura es más baja. Lo anterior, concuerda con la temperatura presentada por la EMHVB la cual se encuentra a 52 m más de altura sobre nivel del mar que la EMSO, por lo que presenta una temperatura media anual menor.

Es necesario considerar, que la EMHVB se encuentra ubicada en un paso de montaña en el sector de los Ángeles de San Ramón, donde se da el ingreso de corrientes de aire frío como son los denominados vientos alisios, provenientes de la vertiente del Caribe (Quesada, 2008), los que provocan aumentos considerables en los valores medios. También cabe destacar, que la EMHVB se encuentra situada en los asentamientos de un bosque tropical húmedo, con posibles variaciones térmicas, así como tendencia a aumentos y disminuciones importantes en la temperatura como consecuencia de la volubilidad en la heliofanía y nubosidad.

Por su parte, la EMSO se ubica en una zona con clima del tipo Pacífico (aunque algunos de sus rasgos son del clima Caribe). Esto implica que cuente con una marcada época seca, con temperaturas medias de 20,01 °C; mientras que la época lluviosa tiene una temperatura promedio de 20,85° C. Además, presenta el característico veranillo entre julio-agosto, lo que incide en algunas variaciones en las temperaturas.

En la figura 3 se muestra el gráfico de contorno de la temperatura, para las estaciones en estudio. En el eje “y” o vertical se indica el mes, en el eje horizontal la hora y en el lado derecho vertical se presenta la escala por color. De acuerdo con lo observado, se tiene para ambas estaciones un valor máximo de temperatura, durante el mes de abril, entre las 11:00 y 16:00 horas, con un pico a las 14:00 horas. En el caso de la EMSO, la temperatura promedio en ese punto fue de 25,62°C y para la EMHVB de 24,12°C. Sin embargo, el contorno de la EMSO refleja otro máximo importante durante el mes de septiembre, a las 13:00 horas, con un valor promedio de 24,92 °C. Cabe destacar, que esta condición se atribuye a un deterioro en el sensor de temperatura que alteró la tendencia de las medidas recopiladas en la serie, creando un metadato en esta variable a partir del año 2014-2015, este sensor fue sustituido por el CIGEFI hasta abril del año 2017, cuando se logró adquirir el nuevo sensor.

a)



b)

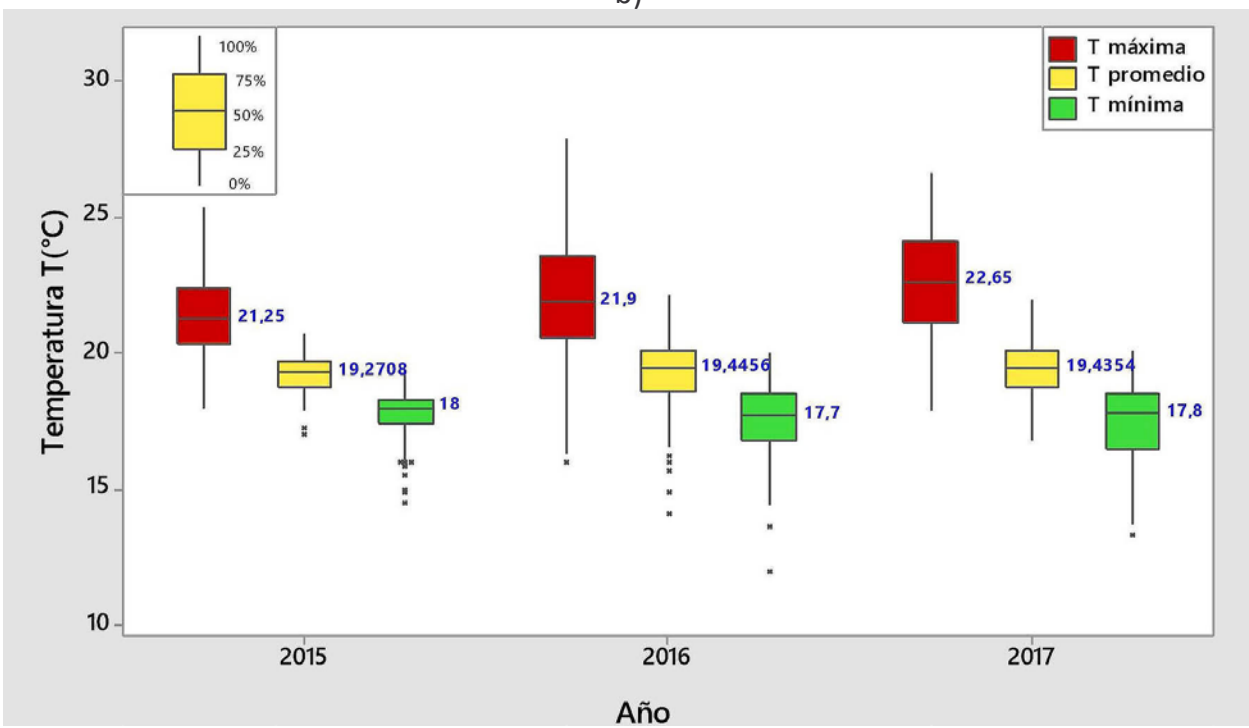


Figura 2. Comportamiento de la temperatura promedio anual en a) EMSO y b) EMHVB.

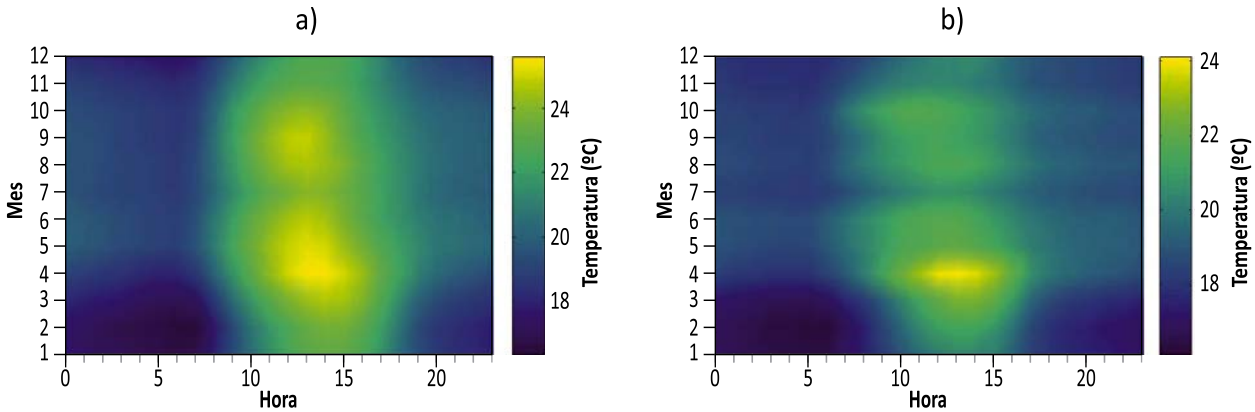


Figura 3. Gráficos de contorno de temperatura en: a) EMSO y b) EMHVB.

Otro aspecto destacable para la zona, es que el periodo o época más fría del año para ambas estaciones se concentra entre noviembre y marzo, con valores cercanos a los 18 °C, registrados principalmente durante la madrugada y la mañana.

4.2. Vientos

En el caso de los vientos, se obtuvo una velocidad promedio de 2,29 m/s en la estación de la Sede de Occidente, mientras que la ubicada en el Hotel Villa Blanca reportó un estimado de 1,99 m/s, ambas con una dirección predominante del Noreste (NO) tal como se indica en la rosa de los vientos que se presenta en la figura 4.

Este modelo de la rosa de los vientos, señala una distribución por intervalos para la intensidad de la velocidad, la figura 4 muestra la estación EMSO de forma radial y las distribuciones de la intensidad de velocidad según la escala de color. Se puede observar en la misma ilustración, que existe una franja verde débil de 2,1 % que corresponde a una intensidad del viento prevista en un intervalo de 5,7 a 8,8 m/s; mientras que el 27,6% representa el valor de mayor significancia estadística a través de la banda del color naranja, reportando valores estimados entre 2,1 y 3,6 m/s.

Lo anterior quiere decir que, para los vientos registrados en la EMSO, los valores más constantes se encuentran en el intervalo naranja, para el caso del EMHVB la condición fue similar, solo que esta franja de color abarcó el 55,6 %, además no se cuenta con distribuciones de valores altos, véase en la figura 4.b como la paleta amarilla representa el límite alcanzado con valores mayores a 3,6 m/s y hasta 5,7 m/s.

Por otra parte, en la figura 5 se muestra un máximo destacado cerca de las 11:00 y hasta las 16:00 horas, para la EMSO se precisa un valor de 4,81 m/s durante el mes de marzo y de 3,62 m/s en febrero para la EMHVB. Además, los vientos registrados en ambas estaciones presentan tendencias similares, ya que se tienen aumentos considerables en la velocidad del viento a finales del mes de diciembre y hasta finales del mes de marzo (Salazar y Vargas, 2017), de igual manera se presenta un periodo de calma, previsto principalmente desde mayo hasta octubre en horas de la tarde-noche y hasta la mañana. Por su parte, en el caso de EMHVB se evidencia un contorno más estable, marcado únicamente por el máximo descrito anteriormente.

Cabe destacar, que la zona de San Ramón se caracteriza de acuerdo con los datos recopilados, por presentar aumentos importantes en la intensidad del viento, durante finales del mes de diciembre y hasta inicios del mes de mayo, esto suele darse principalmente por la entrada de los vientos provenientes del noreste y los pasos de

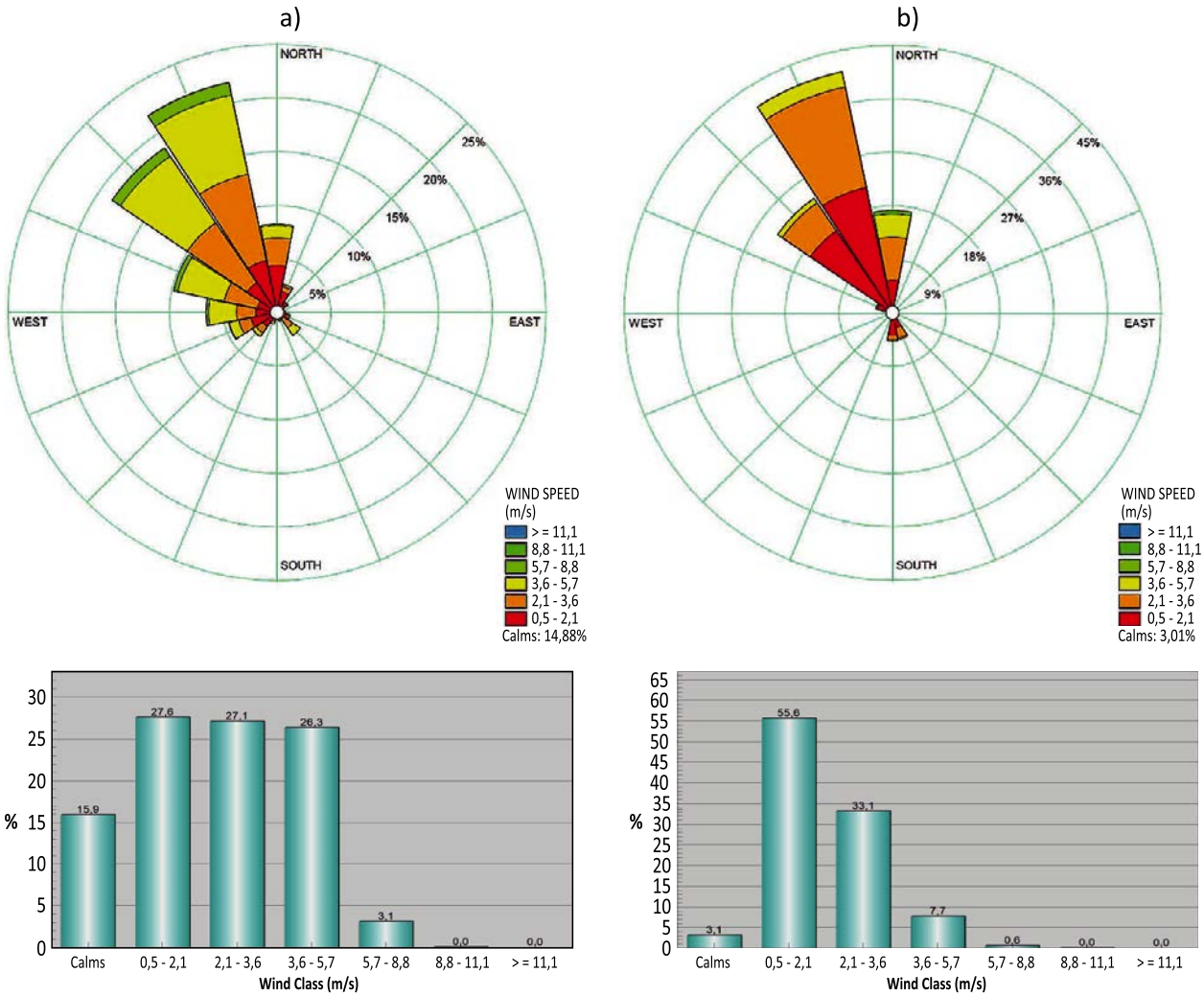


Figura 4. Rosas de los vientos y distribución de la velocidad del viento para a) EMSO y b) EMHVB.

montaña que permiten esta condición (Orozco, 2007). Estos vientos son conocidos como alisios e inciden por la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (Sáenz y Amador, 2016), con estos también se da la presencia de las migraciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (López y Alfaro, 2012), produciendo variabilidad en el viento superficial que transporta (Sáenz y Amador, 2016).

4.3. Precipitación

Este estudio encontró, que el año 2010 fue el de mayor precipitación acumulada anual con 2.907 mm. Este año se destacó por grandes cantidades de impactos asociados a lluvias intensas (Briceño y Alfaro, 2014), la figura 6.a evidencia el importante incremento anual. Es importante destacar, que en el año 2010 Costa Rica fue impactada indirectamente por los huracanes Tomas, Nicole y Mathew, que causaron severos daños en el país (IMN, 2018).

Sin embargo, el valor promedio de precipitación anual fue de 1.557 mm en la EMSO y de 1.051 mm en la EMHVB.

Además, se tiene que las precipitaciones de la región se presentan en dos épocas bien conocidas, una seca que predomina desde finales de diciembre hasta mediados de mayo (López y

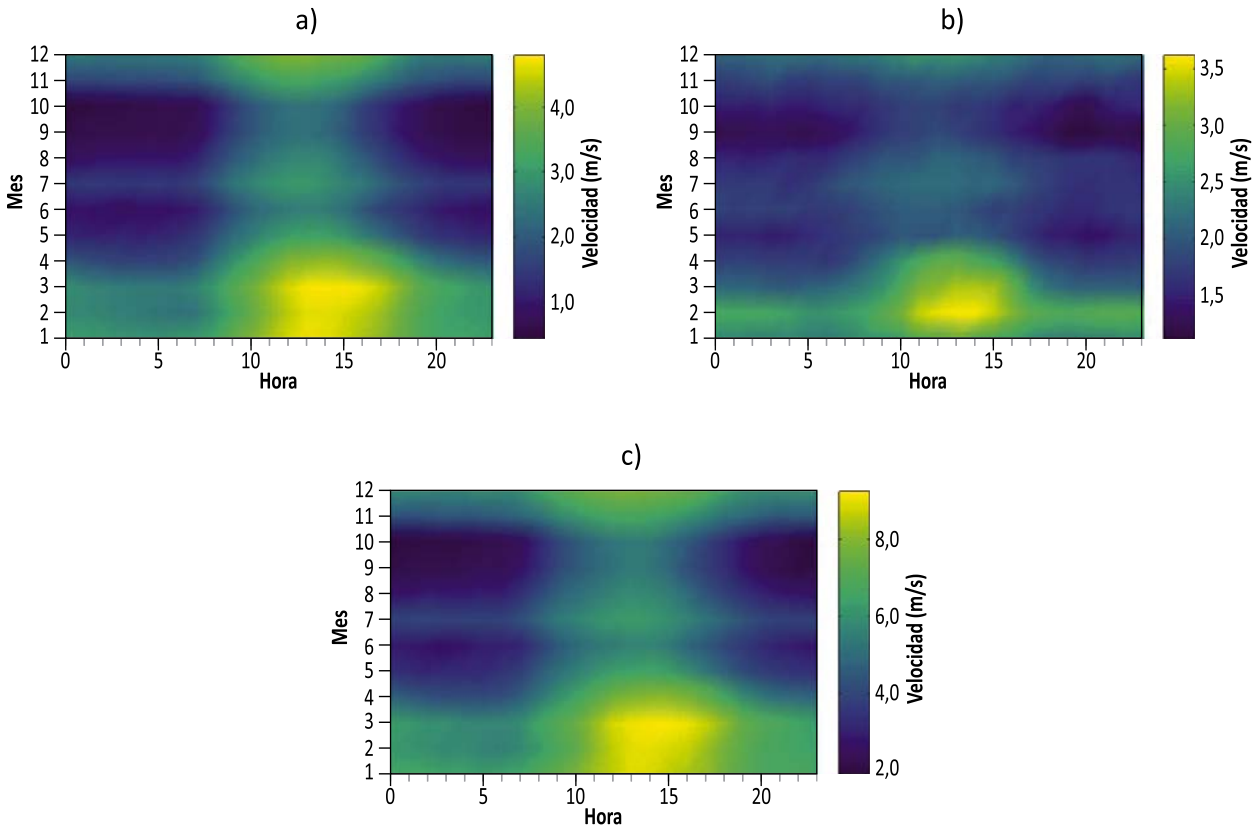


Figura 5. Gráficos de contorno de velocidad del viento en: a) velocidad promedio en EMSO, b) velocidad promedio en EMHVB y c) velocidad máxima en EMSO.

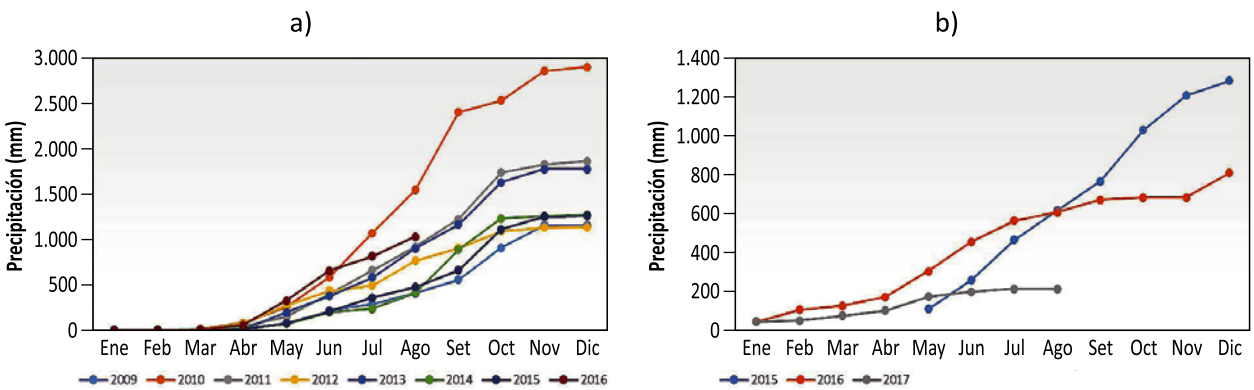


Figura 6. Comportamiento de las precipitaciones acumuladas anuales para a) EMSO y b) EMHVB.

Fuente: Proyecto No. 540-B7-013. Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente.

Alfaro, 2012), mientras que el inicio de la estación lluviosa abarca los restantes meses, con un comportamiento monomodal (Bustamante et al, 2012), con máximos de lluvia durante el mes de octubre, de 349 mm de lluvia acumulada mensual para la EMSO y 264 mm para EMHVB. Durante el periodo lluvioso, para la zona donde se ubica la EMSO es característico una interrupción del ciclo de lluvias, con un mínimo relativo durante el mes de julio y agosto (Magaña et al,1999), denominado canícula o veranillo y considerado un fenómeno normal en la zona.

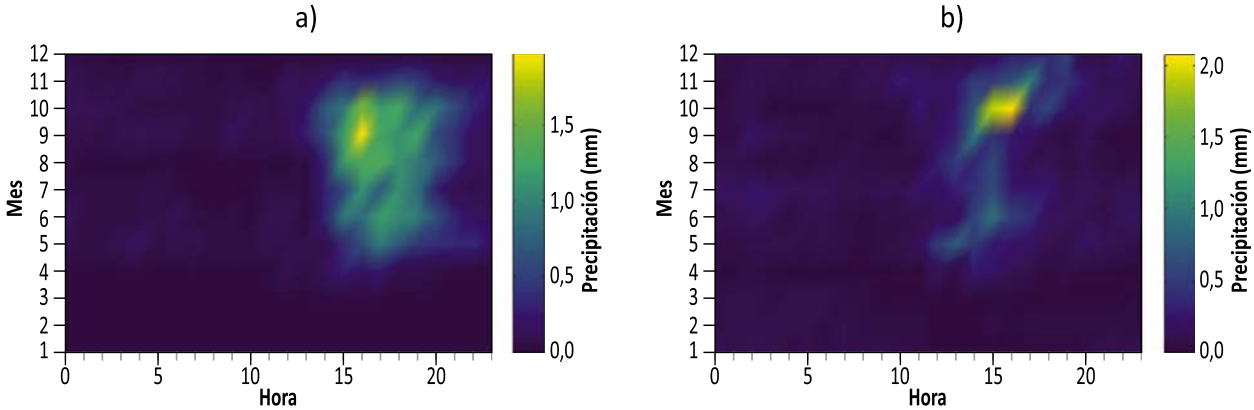


Figura 7. Gráficos de contorno de precipitación en a) EMSO y b) EMHVB.

En la figura 7 se presenta un gráfico de contorno para la precipitación promedio mensual, coincidiendo ambas estaciones con un máximo destacado en el mes de octubre con un valor promedio mensual de 348,5 mm en el caso de la EMSO, mientras que para la EMHVB se destacó un máximo de precipitaciones, con un valor promedio mensual de 264,5 mm.

4.4. Humedad

La ubicación de la zona de San Ramón y la del hotel Villa Blanca el cual se encuentra rodeado de un sistema específicamente montañoso, son la razón fundamental para que la zona se caracterice como húmeda o per húmeda. Los registros muestran que la humedad relativa promedia el 97,42% anual en los sistemas montañosos de la EMHVB, mientras que en la EMSO se estima en 82,75%, con disminuciones considerables durante la época seca entre enero y abril, en horas cercanas a las 14:00 en los momentos que la radiación solar aumenta.

La mayor cantidad de humedad en el aire se presenta en horas de la noche y madrugada, cuando se da el enfriamiento de la superficie por la ausencia de la radiación solar y las bajas de temperatura (ver figura 3.a). En la figura 8.b se destaca la condición mínima en el contorno, no obstante, la zona de los Ángeles presenta una mayor estabilidad de humedad que la registrada por la EMSO, esto puede atribuirse directamente a la gran biodiversidad del bosque tropical y a los árboles presentes en el lugar (Vargas, Venegas, Mora, Martínez, Alanís y De la Rosa, 2019),

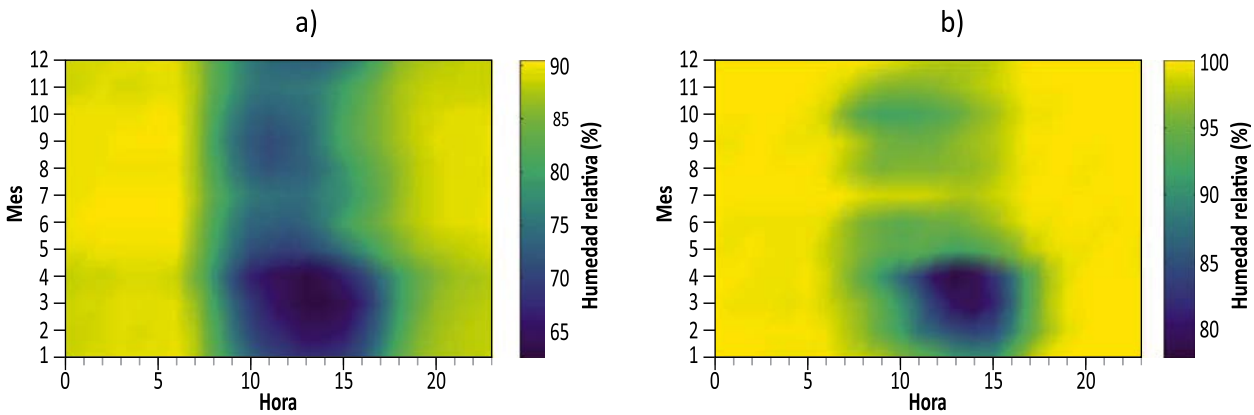


Figura 8. Gráficos de contorno de humedad relativa en a) EMSO y b) EMHVB.

que facilitan las condiciones propicias para una zona húmeda durante todo el año. Además, otro aspecto a considerar se da en la relación presente con los vientos, ya que con el paso de los vientos alisios las zonas se cargan de humedad, principalmente cuando se da el ingreso de los frentes fríos (Alfaro y Briceño, 2014).

4.5. Análisis espectral

Utilizando el modelo de análisis espectral a través de diferentes espectros del tipo periodograma, se elaboraron gráficos para la EMSO y la EMHVB (ver figura 9 y figura 10). Estos fueron representados con un 95% de confianza en su filtro de predicción, para las series de temperatura, viento, precipitación y humedad, en donde se destacó el principal máximo de frecuencia espectral de interés durante el periodo de tiempo designado a cada elemento, según el tamaño de su muestra (ver cuadro 2).

Además, se magnificó el ajuste de la banda para aumentar la sensibilidad del periodograma y la identificación de posteriores ciclos de oscilación en las series temporales, de esta forma, se delimitó una mejor precisión espectral al considerar valores con bajos de ancho de banda, es decir, indicadores con mínimos de tolerancia asociados a todos los máximos frecuenciales.

Los resultados muestran, que todos los espectros presentan un máximo de frecuencia cerca del ciclo de variabilidad 1, lo que representa una incidencia periódica de alrededor de un año, por tanto, algunos periodos destacables como la humedad tienden a variar un poco de una estación a otra, en la EMSO se registró el máximo espectral en 375 días, mientras que la EMHVB fue de 172,8 días, con otros máximos cercanos lo que se atribuye una mayor presencia de humedad para la zona de Villa Blanca.

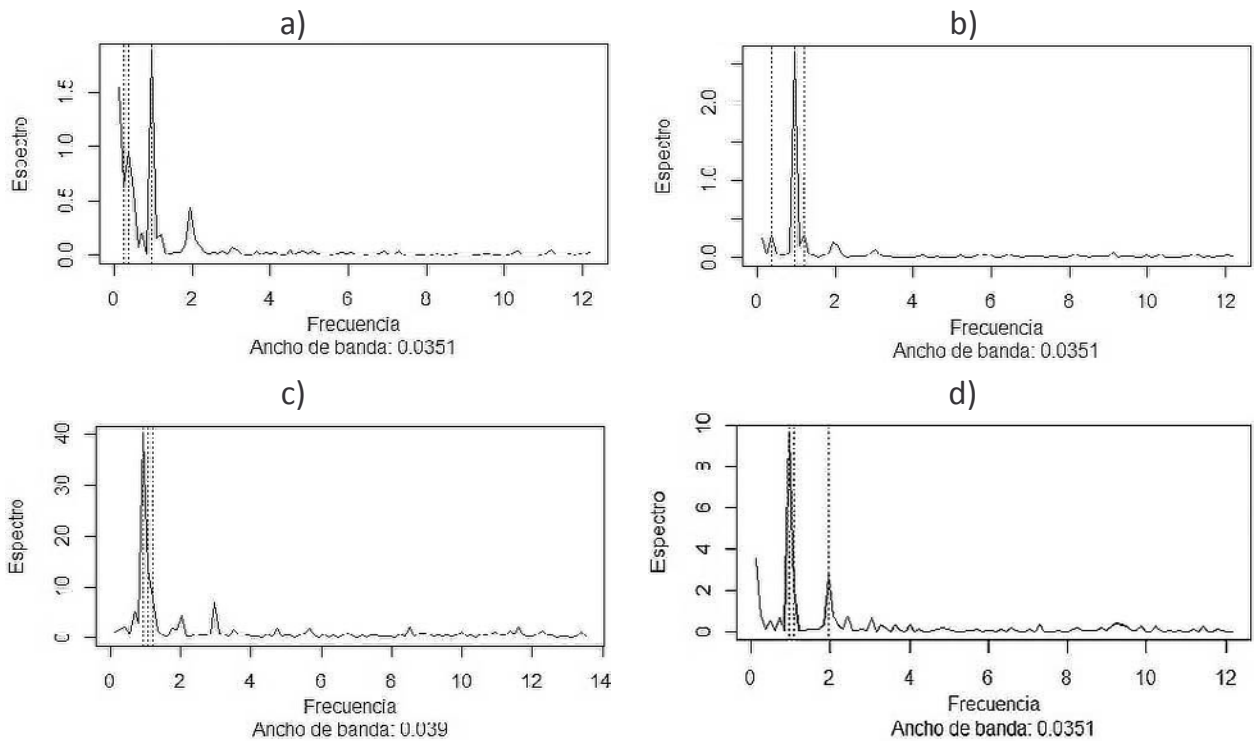


Figura 9. Periodogramas de la EMSO en a) temperatura, b) velocidad del viento, c) precipitación y d) de la humedad para la estación EMSO.

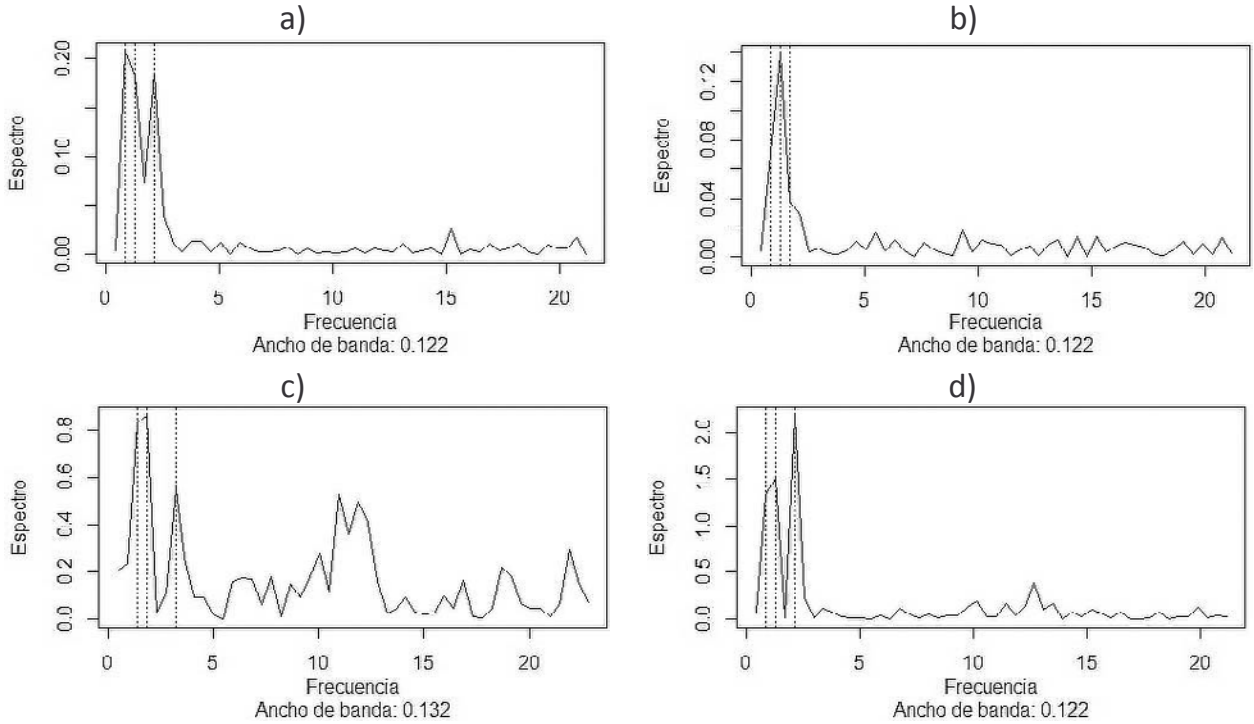


Figura 10. Periodogramas de la EMHVB en a) temperatura, b) velocidad del viento, c) precipitación y d) de la humedad para la estación EMHVB.

Otros resultados interesantes se dieron con la precipitación, donde los ciclos de la EMSO fueron constantes al registrar un máximo anual cada 385,7 días y otro máximo secundario con 337,5 días, no obstante, la estación EMHVB marcó una recurrencia de máximos de menor periodo, con máximos en los 200 y 266,7 días, dejando claro que esta zona tiende a presentar mayores aumentos de precipitación durante un periodo estacional bien delimitado.

En cuanto a la temperatura, su espectro máximo para la EMHVB fue de 432 días, mientras que el principal para la zona central de San Ramón fue de 375 días, dado que la diferencia es de más de 50 días, estos periodos son congruentes, puesto que en la evolución temporal entre los valores máximos y mínimos reflejados en la figura 2 se identifican considerables diferencias en las amplitudes térmicas de una región a otra, sin embargo, se entiende que dichos valores son característicos de la época lluviosa.

Por último, se tiene la presencia del viento que para EMHBV marcó un máximo cercano a los 288 días y para la EMSO en 375 días, esto coincide con un aumento significativo en los vientos durante los meses de diciembre a mayo, siendo más periódico para la zona de Villa Blanca, a pesar del ajuste de banda mayor, con una diferencia de 0,0869 respecto al patrón de sensibilidad en la EMSO, lo que describe un margen mayor de la tolerancia significativa en los ciclos periódicos de la EMHVB.

5. CONCLUSIONES

En primera instancia, es relevante considerar que las muestras utilizadas tanto para la EMSO como para la EMHVB no eran homogéneas en sus tamaños, por lo tanto, el análisis puede presentar diferencias estadísticas en cuanto a los modelos utilizados en algún elemento climático, por lo que sería recomendable trabajar con una mayor cantidad de datos, con frecuencias temporales de

forma horaria y preferiblemente con periodos de tiempo más extensos.

Este primer análisis tomó las muestras de datos registradas por las estaciones, desde el momento de su instalación. Sin embargo, algunos datos atípicos de la EMSO causaron una ausencia valiosa de información, como fue el caso de la precipitación para el año 2016, donde se dejaron de contabilizar datos relevantes que pudieron aportar información valiosa en el reporte del huracán Otto[5].

En relación con el análisis temporal y estadístico, los resultados identifican a San Ramón como una región de clima tropical húmedo con presencia de dos épocas, una seca con pocas precipitaciones, con aumentos en la intensidad de los vientos provenientes del noreste y otra lluviosa en la que predominan los mayores índices porcentuales de humedad relativa (Amador, Hidalgo, Alfaro, Calderón y Mora, 2019). Cabe destacar que, a pesar de algunas fluctuaciones numéricas entre las estaciones de ambas regiones, las tendencias climatológicas son bastante constantes de un año a otro, no dejando de lado que algunos eventos suelen ser representativos y crean pequeñas diferencias, como es el caso de las tormentas Tomas, Nicole y Mathew, que se produjeron durante el año 2010 (IMN, 2018).

El análisis espectral mostró un comportamiento recurrente para las cuatro variables estudiadas, con periodos característicos con margen de un año en la mayoría de los casos, sin embargo, la periodicidad para las series temporales de la EMHBV son escazas, ya que el periodograma presenta pocas sucesiones ante el tamaño de la muestra e induce valores altos de sensibilidad en los ajustes de banda, por tanto, es indispensable realizar procesos estocásticos del tipo espectral que vinculen mayor información de datos con bajos ajustes de ancho de banda, que permitan relacionar al menos dos máximos frecuenciales y con ello delimitar la recurrencia periódica de estos eventos climatológicos, a fin de comprender con mayor claridad el comportamiento climatológico de la región.

5 Puede consultar más al respecto de este evento en: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Informe+IMN+Hurac%C3%A1n+Otto

6. AGRADECIMIENTOS

La investigación bajo el proyecto N° 540-B7-013 inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, agradece la colaboración y apoyo brindado por la coordinación de Investigación de la Sede de Occidente, el Centro de Investigaciones Geofísicas CIGEFI, el Instituto Meteorológico Nacional, el Programa de Investigaciones para la Recuperación y Sostenibilidad de la Microcuenca Alta de la Quebrada Estero 540-B5-713. Se agradece también a los funcionarios responsables de las estaciones meteorológicas EMSO y EMHVB, ya que sin el cuidado y mantenimiento oportuno no habría sido posible la recopilación de las bases de datos analizadas.

7. REFERENCIAS

Alfaro, E. y Briceño, P. (2014). Análisis del impacto de fenómenos meteorológicos en Costa Rica, América Central, originados en los mares circundantes. *Revista de Climatología*. Volumen 14 (1-11). Doi: ISSN 1578-8768. (Págs 2;6;8).

Amador, J. A; Hidalgo, H. G.; Alfaro, E. J.; Calderón B. & Mora, N. (2019). Central America [in "State of the Climate in 2018*"]. Bull. Amer. Meteor. Soc.,* 100 (9), S197– S198, ES32-ES35, doi:10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1. (P. 198).

Bustamante, A.; Martínez, A.; Espitia, J. y Cárdenas, E. (2012). Análisis de datos meteorológicos para identificar y definir el clima en Yopal, Casanare. *Revista Med.*

Vet. Número 25 (85-92). Bogotá, Colombia. Doi: ISSN 0122-9354.

Castro, L. y Carvajal, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Revista de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*. Número 9. Universidad del Valle. Cali, Colombia. Doi: ISSN: 1692-9918. (P. 16)

Centro de Investigaciones GeoFísicas. (2018). *Condiciones atmosféricas San Ramón*. Recuperado de: http://tooji.cigefi.ucr.ac.cr/wlinksr/Current_Vantage_Pro.htm.

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (2018). *Condiciones actuales del tiempo, estación automática hotel Villa Blanca, San Ramón, Alajuela*. Recuperado de: https://www.imn.ac.cr/especial/estacionvblanca.html.

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (2018). *Los huracanes y sus efectos en Costa Rica*. Recuperado de: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31306/9-LOS+HURACANES+Y+LOS+EFECTOS+EN+COSTA+RICA/dce06c47-915f-4517-a001-30cbf6f890d9 .

López, B. y 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*. Volumen 12 (61-79). ISSN 1578-8768. (Págs. 63;69).

Magaña, V.; Amador, J.A. y Medina, S. (1999) The midsummer drought over Mexico and Central America. *J. Climate*. Número 12 (1577-1588). (P. 11).

Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guías prácticas climatológicas*. Volumen OMM-N°100. Ginebra, Suiza. Doi: ISBN 978-92-63-30100-0. (Págs. 45;53).

Orozco, E. (2007). *Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de infraestructura vial*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. (P. 11).

Quesada, M. (2008). Distribución interestacional de la precipitación en la región extremo oeste de la Depresión Tectónica Central de Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*. Universidad de Costa Rica. Vol 8, N° 10-11. (P. 24).

Rodríguez, R. y Llasat, M. (1997). Análisis temporal y espectral de la serie de precipitación mensual de Barcelona (España) 1850-1991. *Revista de Ingeniería del Agua*. Volumen 4, N° 4. Universidad politécnica de Valencia. Doi: 10.4995/ia.1997.2732. (Págs. 19-21).

Sáenz, F. y Amador, J. (2016). Características del ciclo diurno de precipitación en el Caribe de Costa Rica. *Revista de Climatología*. Volumen 16, N°16. ISSN: 1578-8768. (Págs. 21-34).

Salazar, A. y Vargas, J. (2017). Algunos aspectos técnicos sobre la Estación Meteorológica Automática de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes. *Revista Pensamiento Actual*. Volumen 17 (96-104). Doi: ISSN 2215-3586. (P. 102).

Universidad de Costa Rica. (2012). *Poemas gráficos*. Sede de Occidente. Recuperado de: http://www.so.ucr.ac.cr/poemasgraficos/san-ramon.html.

Serrano, S.; Zuleta, D.; Moscoso, V.; Jacome, P.; Palacios, E. y Villacís, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el distrito metropolitano de Quito. *La GRANJA Revista de Ciencias de la Vida*. Volumen 16 (23-47). (P. 28).

Solano, J. y Villalobos, R. (2015). *Regiones y subregiones de Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional. Departamento de Desarrollo. Recuperado de: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica.

Vargas-Vázquez, V. A.; Venegas-Barrera, C. S.; Mora-Olivo, A.; Martínez-Ávalos, J. G.; Alanís-Rodríguez, E. y Rosa-Manzano, E. D. L. (2019). Variación en la abundancia de árboles maderables por efecto de borde en un bosque tropical subcaducifolio. *Botanical Sciences*. 97(1), (Págs. 35-49). Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-42982019000100035&script=sci_arttext .

Walpole, R; Myers, R & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para Ingeniería y Ciencias*. Novena Edición. Editorial Pearson. Ciudad de México, México. (Págs. 24-25).

Modelos de biomasa y carbono en ecosistemas forestales naturales en Costa Rica

WILLIAM FONSECA GONZÁLEZ[1]
FEDERICO ALICE GUIER[2]
RONNY VILLALOBOS CHACÓN[3]

Resumen

El objetivo del estudio fue cuantificar la biomasa y el carbono almacenado en bosques naturales de tres zonas geográficas de Costa Rica, a fin de desarrollar modelos para predecir la biomasa y el carbono por componente del árbol y para el ecosistema. Con un muestreo aleatorio en parcelas anidadas y utilizando el método destructivo se evaluó la biomasa arbórea y subterránea de árboles de diámetro promedio, la necromasa y la vegetación herbácea. A través de regresión lineal simple se desarrollaron modelos usando como variable predictora el diámetro y el área basal por hectárea. Los modelos elegidos para los componentes estructurales del árbol, para el árbol completo y para el ecosistema, presentaron ajustes muy satisfactorios (R^2>78,7%) con bajo error de estimación. La biomasa total osciló entre 162,3 Mg ha^{-1} (73,7 Mg C) en la zona norte y 476,4 Mg ha^{-1} (208,2 Mg C) en los bosques de las zonas altas, el 93,6% corresponde a biomasa o carbono en los árboles. La fracción de carbono varió entre 34,2% en la necromasa fina y 45,6% en el fuste y la raíz. El factor de expansión de biomasa para incluir la copa fue de 1,5 y de 1,41 para la raíz.

PALABRAS CLAVE: BIOMASA, BOSQUE NATURAL, CARBONO, MODELOS ALOMÉTRICOS, SERVICIOS AMBIENTALES, REGRESIÓN LINEAL.

Abstract

The aim of this study was to quantify biomass and carbon stored in natural forests of three distinct geographic regions of Costa Rica, in order to develop allometric models per tree component and for each ecosystem. Above and belowground biomass was evaluated using a random sampling design, nested plots and a destructive method for trees with average diameter, necromass and herbaceous vegetation. Models were developed through simple lineal regressions using diameter and basal area (ha) as predictive variables. The selected models for tree components, the whole tree and for the ecosystem showed a satisfactory goodness of fit (R^2>78.7%) and a low estimation error. Total biomass varied between 162.3 Mg ha^{-1} (73.7 Mg C) in the North Region and 476.4 Mg ha^{-1} (208.2 Mg C) in mountain forests (≥ 1000 m asl), with 93.6% corresponding to tree biomass. Carbon fractions varied between 34.2% in fine necromass and 45.6% in tree stems and roots. The biomass expansion factor was 1.5 while the root/shoot ratio was 1.41.

KEY WORDS: BIOMASS, NATURAL FOREST, CARBON, ALLOMETRIC MODELS, ENVIRONMENTAL SERVICES, LINEAR REGRESSION.

1 Doctor en Cambio Global y Desarrollo Sostenible. Docente e investigador de la Escuela de Ciencias Ambientales e Instituto de Investigación y Servicios Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica, wfonseca@una.cr. https://orcid.org/0000-0002-4546-9035

2 Doctor en Ecología y Manejo Forestal. Docente e investigador de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: federico.alice.guier@una.cr. https://orcid.org/0000-0002-6155-0562

3 Máster en Ciencias Forestales. Docente e investigador de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: ronny.villalobos.chacon@una.cr. https://orcid.org/0000-0003-2606-5286

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques juegan un papel importante dentro del ciclo global de carbono a través de la remoción, almacenamiento y liberación de dióxido de carbono (CO_2). Estos contienen aproximadamente el 80% de toda la biomasa viva del planeta (Chave et al., 2009) y de esta, los bosques tropicales representan el 40% y son responsables del 35% de la producción primaria neta global (Schimel et al., 2002). Sin embargo, es también en estos bosques donde existe la mayor incertidumbre sobre el intercambio de gases entre el reservorio terrestre, la atmósfera y los océanos (Avitabile et al., 2016; Drake et al., 2018). Por esta razón, es necesario el mejor entendimiento de los procesos que determinan este intercambio de gases para conocer el efecto que tienen los bosques sobre el clima y viceversa.

Además, las iniciativas que pretenden la mitigación del cambio climático a través del manejo de ecosistemas forestales requieren de información confiable sobre las emisiones y remociones de carbono asociadas al cambio de uso del suelo (Avitabile et al., 2016; Van Breugel et al., 2011; Chave et al., 2014). También la estimación de la biomasa brinda información relevante sobre las funciones que cumple el ecosistema, y es capaz de explicar gran parte de los procesos ecológicos y la capacidad del bosque de prestar servicios ambientales (Chave et al., 2009; Lohbeck et al., 2015).

En un bosque, el carbono se encuentra distribuido en la biomasa arriba y abajo del suelo, materia orgánica muerta y el suelo. Debido a que la biomasa en árboles es el principal componente, la mayoría de los esfuerzos se han dirigido hacia su cuantificación. Componentes como las raíces (biomasa abajo del suelo) difícilmente se cuantifican (Chave et al., 2009) y en aquellos casos en que se realiza, es usualmente utilizando factores de expansión que convierten biomasa arriba del suelo (tronco) en biomasa abajo del suelo. Debido a la variación que ocurre por las condiciones del sitio, las características del bosque y su manejo, este componente requiere de mayor atención (Mohren et al., 2012).

La variabilidad en las condiciones del sitio, es la responsable de gran parte de la incertidumbre en los estimados de carbono. La biomasa en los distintos compartimentos puede variar debido a disturbios antropogénicos y naturales, diferencias en la edad del bosque, topografía, suelos y clima (Baccini et al., 2012; Van Breugel et al., 2011; Saatchi et al., 2011). Además, la composición de las especies varía según estas condiciones, y cada especie presenta distintas estrategias de crecimiento y sobrevivencia, que determinan la distribución de la biomasa entre sus componentes (raíz, fuste, ramas y hojas). Por ejemplo, la densidad de la madera y consecuentemente el contenido de carbono varía según las especies, las condiciones del sitio y la posición dentro del árbol (Chave et al., 2009; Mohren et al., 2012), y es por esto que es necesaria más información tanto a nivel de bosque como de los componentes individuales (Schimel et al., 2002).

Debido a que el principal componente se refiere a la biomasa de árboles, el método más común para estimar carbono es la combinación de inventarios forestales y el uso de modelos alométricos (Van Breugel et al., 2011). Estos son modelos de regresión, que utilizan diámetro y/o altura principalmente para predecir la biomasa aérea, y a la vez contribuyen en mejorar el entendimiento sobre el desarrollo evolutivo y arquitectónico de las plantas (Chave et al., 2014). Para que estos modelos sean representativos del bosque, es determinante la disponibilidad de estudios de cosecha destructiva y esto requiere de una inversión alta de tiempo y dinero (Chave et al., 2014), especialmente si se obtiene información de todos los componentes del bosque. También la diferenciación por tipo de ecosistema es importante por dos razones.

Primero, porque los modelos deben reflejar las condiciones del sitio y por esto se dice que son específicos de sitio (Dutcă et al., 2020). Segundo, porque al presentar modelos diferenciados por tipo de bosque se limita cualquier error asociado a la selección de modelos por el usuario; siendo esta selección otra fuente importante de incertidumbre en los estimados de carbono (Van Breugel et al., 2011; Chave et al., 2014; Dutcă et al., 2020).

Las razones antes citadas motivaron el inicio de una investigación, cuyo objetivo primordial fue cuantificar el carbono almacenado y desarrollar modelos (basados en la cosecha destructiva de una muestra representativa de árboles) para estimar la biomasa y el carbono, que mejor representen las condiciones actuales de los ecosistemas forestales naturales de la Zona Norte, Pacífico Central y Zonas Altas en Costa Rica. Adicionalmente, se calcularon factores de expansión de biomasa y la fracción de carbono en los distintos componentes de la biomasa y la necromasa.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

Los ecosistemas evaluados fueron el bosque natural primario o secundario y sus características biofísicas (cuadro 1), ubicados en diferentes partes del país y agrupados en tres zonas:

a) Pacífico Central, que corresponde al Área de Conservación Pacífico Central (ACOPAC).
b) Zona Norte, abarca los cantones San Carlos, Los Chiles y Upala.
c) Zonas Altas, los bosques comprendidos entre 1.000 y 3.000 msnm en cualquier parte del país.

2.2. Diseño de muestreo, selección de sitios y distribución de las unidades de muestreo

El diseño de muestreo fue aleatorio sin reemplazo, se cubrió cada zona con una malla imaginaria de cuadrículas de 36 km^2 (6 km x 6 km), lo que

Cuadro 1. Condiciones biofísicas de las zonas estudiadas

Zona Norte	Altitud (m.s.n.m.)	50 a 158 (Datos de GPS en sitios muestreados, 2016-2018)
	Lluvia media anual (mm)	3.028-3.768 (IMN, 2008)
	Zona de vida	Bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical, bosque muy húmedo pre montano (Bolaños et al., 2005)
	Temperatura promedio anual (°C)	Oscila entre los 17°-30° (IMN, 2008)
Pacífico Central	Altitud (m.s.n.m.)	5-740 (Datos de GPS en sitios muestreados, 2016-2018)
	Lluvia media anual (mm)	310-3.900 (IMN, 2008)
	Zona de vida	Bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical, bosque muy húmedo pre montano, bosque pluvial pre montano, bosque pluvial montano bajo (Bolaños et al., 2005)
	Temperatura promedio anual (°C)	Oscila entre los 22°-32° (IMN, 2008)
Zonas Altas	Altitud (m.s.n.m.)	1.050-2.999 (Datos de GPS en sitios muestreados, 2016-2018)
	Lluvia media anual (mm)	2.700-4.850 (IMN, 2008)
	Zona de vida	Bosque pluvial pre montano, bosque pluvial montano, bosque muy húmedo montano, bosque muy húmedo pre montano (Bolaños et al., 2005)
	Temperatura promedio anual (°C)	Oscila entre los 4°-27° (IMN, 2008)

Fuente: Elaboración propia.

representa una población (N) de 275 en la Zona Norte, 225 para el Pacífico Central y 376 en zonas altas (figura 1). El tamaño de la muestra (n) se fijó con base a una intensidad de muestreo del 4%; resultando en 11 sitios para la Zona Norte, 10 en el Pacífico Central y 14 en zona de altura. En cada sitio se eligió uno o más bosques de distintas edades, para obtener variabilidad en densidad de biomasa y se establecieron las unidades de muestreo para cada componente de biomasa (i.e. arriba y abajo del suelo, vegetación herbácea y necromasa).

2.3. Evaluación de la biomasa

El material leñoso vivo (árboles y arbustos) con Dap≥10 cm (diámetro normal a 1,3 m sobre el nivel del suelo) se evaluó en parcelas rectangulares de 20 x 25 m (500 m^2) (55 en la Zona Norte y Zonas Altas y 50 en el Pacífico Central) y en un cuadrante o subparcela de 125 m^2 los árboles con Dap entre 2,5 cm y 9,9 cm (figura 2). Para cada individuo se identificó la especie. Posteriormente, se definieron cuatro clases diamétricas: <10 cm, 10-19,9; 20-39,9 y ≥40 cm (Fonseca et al., 2019)

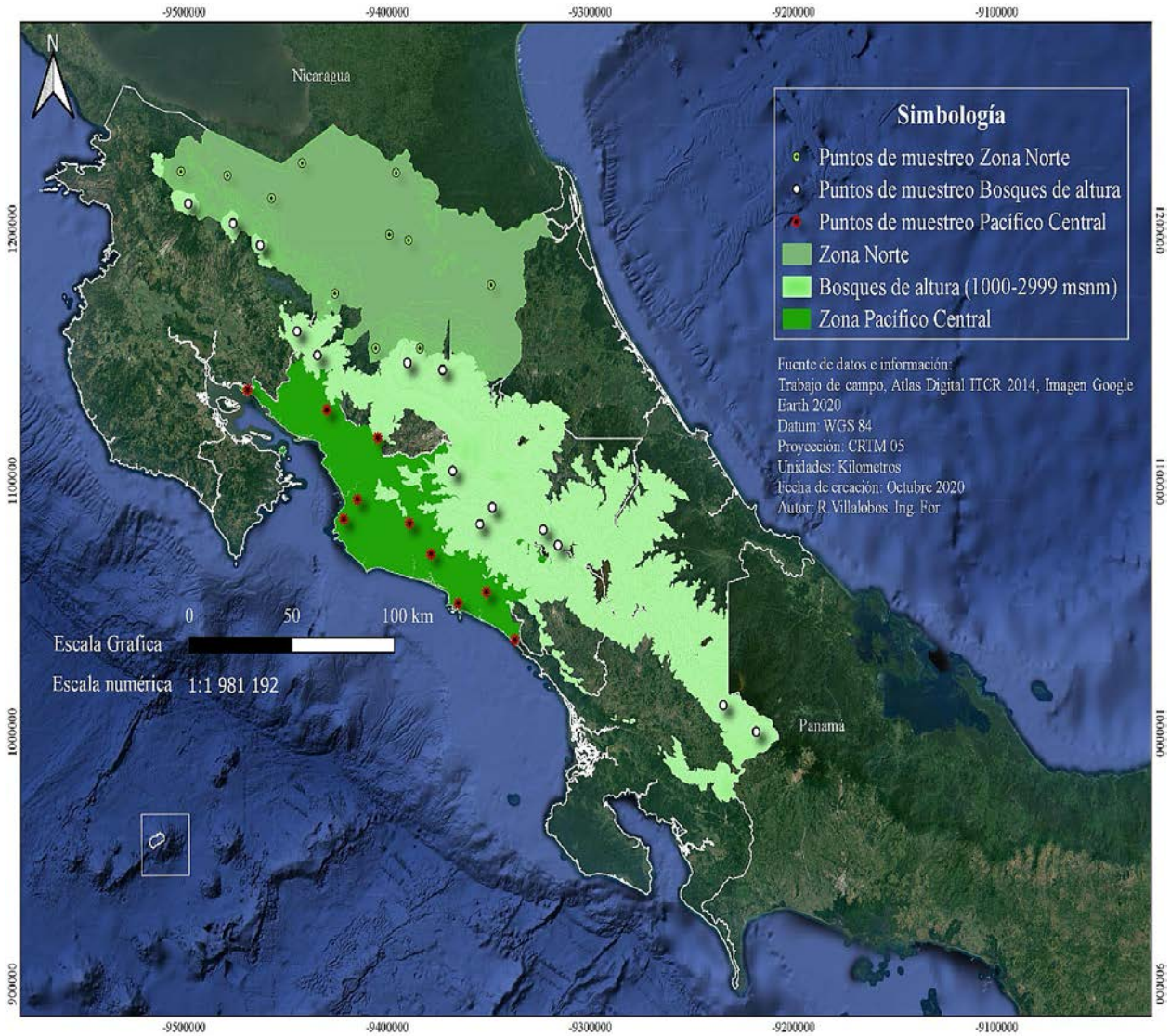


Figura 1. Sitios elegidos para establecer unidades de muestreo y evaluar la biomasa.

y para cada rango diamétrico se determinó la especie de mayor Índice de Valor de Importancia (IVI) (Krebs, 1985).

La biomasa de los árboles de las especies con mayor IVI y de Dap ≤40 cm se determinó haciendo uso del método destructivo, que consiste en derribar el árbol (109, 55 y 105 para la Zona Norte, Pacífico Central y Zonas Altas, respectivamente) y pesar en el campo (peso húmedo en kg) cada componente por separado (fuste, ramas, hojas y raíz). La raíz se extrajo con una retroexcavadora y pulift (tipo tecle manual que funciona de forma horizontal), posteriormente se lavó para eliminar componentes como piedra y tierra.

En los árboles de las clases diamétricas mayores a 40 cm, se determinó el diámetro en pie, en secciones de dos metros con la ayuda de un dendrómetro (CRITERION RD 1000) y el volumen se calculó con la fórmula de Smalian. La biomasa del fuste para cada individuo, se calculó como el producto del volumen por la densidad específica de la madera (Brown et al., 1989; Brown, 1997; Chave, et al., 2004; Petrokofsky et al., 2012; Chave et al., 2014; Cifuentes et al., 2015). La biomasa total (incluida ramas, hojas y raíz) se obtuvo haciendo uso de factores expansión de biomasa, calculados por especie para las clases inferiores a 40 cm.

La vegetación herbácea y leñosa pequeña (gramíneas, bejucos, helechos, plantas pequeñas y arbustos o regeneración de árboles con Dap <2,5 cm), se cuantificó en una parcela de 1 x 1 m ubicada, por facilidad, en cada esquina de la parcela de 500 m² (figura 2). La necromasa fina compuesta por material leñoso con diámetro <2 cm y hojarasca, se evaluó en cuatro parcelas de 0,5 x 0,5 m, y la necromasa gruesa (material leñoso con diámetro ≥2 cm) en una parcela de 5 x 5 m, ambas ubicadas aleatoriamente en la parcela de 500 m² (figura 2).

Cada componente de la biomasa o la necromasa se pesó en el campo y se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg (581, 350 y 585 para la Zona Norte, Pacífico Central y Zonas Altas, respectivamente) para determinar la materia seca (a 60 °C durante 72 horas) y la fracción de carbono en el laboratorio (Fonseca, Alice y Rey-Benayas, 2009).

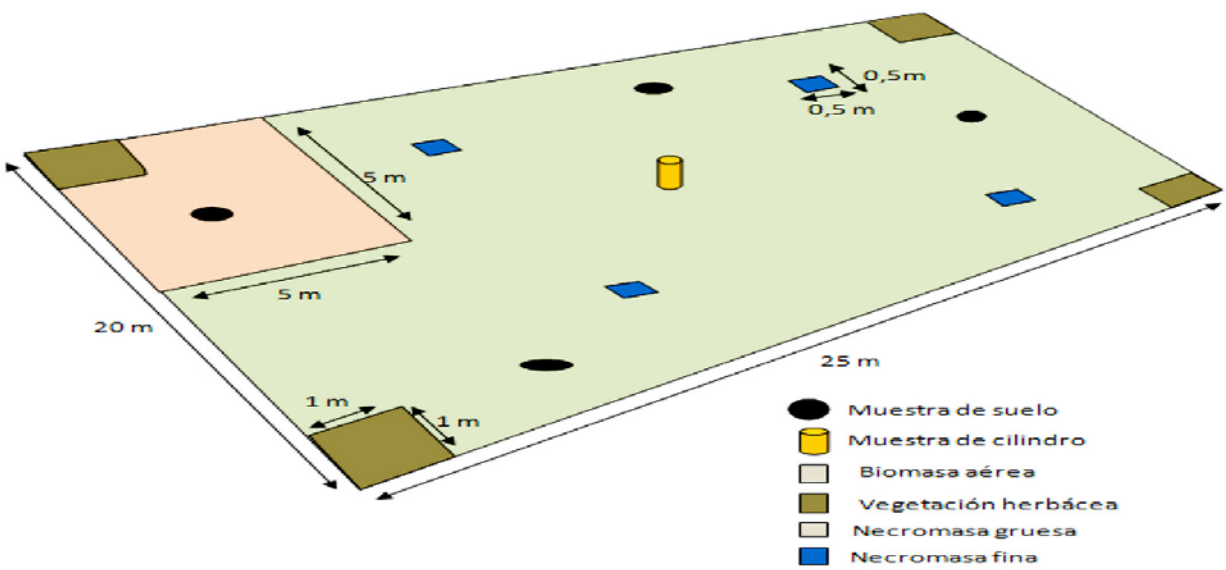


Figura 2. Unidad de muestreo para estimar biomasa y carbono.

2.4. Factor de expansión de biomasa (FEB) y Determinación de la fracción de carbono (FC) en biomasa

El FEB es el cociente entre la biomasa aérea total y la biomasa del fuste, o entre la biomasa del fuste y la biomasa de cada uno de los otros componentes (hojas, ramas, raíz) (Segura et al., 2000, Loguercio y Defossé, 2001; Dauber et al., 2002; Segura y Kanninen, 2002; Fonseca, 2009; Návar, 2009).

La muestra seca de cada componente de biomasa, se trituró a 10 micras para determinar la materia orgánica (MO). El análisis de la MO se realizó haciendo uso de la metodología de Walkey y Black (Álvarez y Marín, 2011).

2.5. Ajuste de modelos

Se realizó un análisis de regresión simple, mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgrapihcs versión 3.1.3. Se ensayaron aproximadamente 10 modelos para la biomasa y el carbono de cada componente del árbol (Bhojas, Chojas, Bramas, Cramas, Bfuste, Cfuste, Braíz, Craíz), para la biomasa y el carbono leñosos del árbol –fuste+ramas+raíz- (Bleñosa, Cleñoso) y para el individuo total (Btotal, Ctotal), usando como variable independiente el Dap (cm).

Se examinaron un número similar de modelos, para predecir la biomasa y el carbono por hectárea (modelos agregados) usando el área basal en $m^{2*}ha^{-1}$ (G) como variable independiente y la variable respuesta: 1) el componente arbóreo (Barbórea, Carbóreo), es decir, el total de árboles incluyendo hojas+ramas+fuste+raíz; 2) para el componente leñoso (Bleñosa, Cleñoso) como la suma de ramas, raíz y fuste, 3) a nivel de ecosistema (Btotal, Ctotal) que incluye la suma del total de árboles, la vegetación herbácea y la necromasa.

En los modelos a nivel de árbol y por hectárea, se probaron transformaciones logarítmicas de las variables para mejorar el ajuste y corregir la heterocedasticidad (Picard et al., 2012, Bueno et al., 2019). El rango diamétrico usado para generar los modelos a nivel de árbol, así como para los modelos agregados se presentan en el cuadro 2, también se muestra el número de especies (de mayor IVI) evaluadas por zona.

La selección de la ecuación de mejor ajuste se realizó tomando en cuenta: a) la variabilidad del modelo explicada por el coeficiente de determinación (R^2) (Puc et al., 2020), b) la precisión de las estimaciones en función a la raíz del cuadrado medio del error (RCME) (Aquino et al., 2015; Forrester et al., 2017; Puc et al., 2020 y

Cuadro 2. Condición dasométrica de los ecosistemas estudiados

Clase diamétrica (cm)	Zona Norte	Pacífico Central	Zonas Altas
≤9,9	12	10	13
10-19,9	28	25	48
20-29,9	31	16	31
30-39,9	28	3	13
40-49,9	4	1	7
50-59,9	5	8	16
60-69,9	1	1	11
70-79,9	1	4	2
80-89,9	0	4	2
90-99,9	1	1	1
≥100		2	3
Otras características			
Dap mínimo (cm)	3,8	3,5	3,7
Dap máximo (cm)	99	103	127,1
G mínima (m^2 ha^{-1})	0,98	6,6	9,8
G máxima (m^2 ha^{-1})	58,8	93,0	92,3
N° especies	39	40	68

Fuente: Elaboración propia.

c) el comportamiento de la ecuación determinado por el error absoluto medio (EMA) (Forrester et al., 2017).

La precisión y validación de los modelos tomó en consideración: a) el método gráfico de dispersión entre los observados vs predichos (Puc et al., 2019), y b) el error absoluto promedio porcentual o sesgo: EAPP=1/n*(Σ(P-O)/O)*100)) (Bueno et al., 2019; Chave et al., 2014; Cortés et al., 2019; Forrester et al., 2017; Puc et al., 2020), donde: P es la biomasa o carbono predicho o simulado; O la biomasa o carbono observado y n el total de datos.

Adicionalmente, se calculó el estadístico Durbin Watson (DW) que mide la independencia de los datos (Ramos et al., 2014), el Índice de Furnival (IF) para comparar modelos lineales con aquellos donde la variable dependiente es transformada (Segura y Andrade, 2008), el criterio de información de Akaike (AIC) como medida relativa de la calidad del modelo (Chave et al., 2005) y error cuadrático medio (ECM) y la diferencia agregada (DA) de ambas medidas de precisión.

Todos los estadígrafos calculados fueron ranqueados según su magnitud relativa, tomando como referencia la metodología expuesta por Salas (2002), Segura y Andrade (2008) y Bueno et al. (2019).

3. RESULTADOS

3.1. Biomasa y carbono en la vegetación y necromasa

En la Zona Norte, los bosques evaluados presentaron un área basal promedio por hectárea (G) de 21,3 m², con un mínimo de 0,98 y un máximo de 58,8. La biomasa arbórea alcanzó un promedio de 162,3 Mg ha^{-1} y el carbono 73,7 Mg ha^{-1}. En la región Pacífico Central el G fue de 38,2 m², variando entre 6,6 y 93,0 m². La biomasa de 306,8 Mg y el carbono de 198,9 Mg. En las Zonas Altas

Cuadro 3. Distribución de la biomasa y el carbono (Mg) en las zonas muestreadas

Zona	Estadístico*	Área basal (m2 ha-1)	Vegetación herbácea y necromasa		Componente arbóreo	
			Biomasa	Carbono	Biomasa	Carbono
Zona Norte	X	21,3	31,4	11,1	162,3	73,7
	SD	11,6	16,6	5,9	103,8	46,1
	E%	9,4	22,3	72,2	3,1	8,2
	n	55	55	55	55	55
Pacífico Central	X	38,2	10,3	4,1	306,8	198,9
	SD	16,7	7,3	2,9	151,6	99,7
	E%	5,3	19,6	73,5	2,6	4,5
	n	51	51	51	51	51
Zonas Altas	X	38,7	29,7	12,3	476,4	208,2
	E%	5,2	10,1	32,7	0,8	2,4
	SD	16,8	42,6	18,4	211,2	90
	n	56	56	56	56	56

Fuente: Elaboración propia.

Nota*: X = Promedio, n = tamaño de la muestra, SD = desviación estándar, E% = error de muestreo.

Cuadro 4. Porcentaje de carbono en los componentes de la biomasa en ecosistemas forestales de Costa Rica

Zona	Estadístico*	Componente del árbol				Necromasa		Vegetación herbácea
		hojas	ramas	fuste	raíz	gruesa	fina	
Zona Norte	X	36,7	45	44,7	41,8	45,2	34,2	35,3
	SD	6,0	4,4	4,5	3,9	5,9	3,6	4,1
	E (%)	4,03	3,4	3,1	3,3	9,1	7	6,1
	n	66	34	42	34	11	12	16
	No. especies	33	21	27	14			
Pacífico Central	X	35,9	44,6	43,9	44,4	43,9	37,0	37,9
	SD	5,3	5,4	7	3,9	6,2	3,7	3,7
	E (%)	3,8	3,1	4,1	3,2	5,3	3,5	3,3
	n	61	61	61	32	35	33	36
	N° especies	39	37	41	19			
Zonas Altas	X	37,2	44,1	45,6	45,6	44	36,8	37,7
	SD	5,34	3	4,13	4,3	5,3	4,2	3,7
	E (%)	2,9	1,4	1,8	2,8	3,5	3,9	3,1
	n	108	89	106	46	50	36	41
	N° especies	38	43	42	25			

Fuente: Elaboración propia.

Nota*: X = Promedio, n = tamaño de la muestra, SD = desviación estándar, E% = error de muestreo.

el G fue de 38,7m² (9,8-92,3 m²), la biomasa de 476,4 Mg y el carbono de 208,2 Mg. La necromasa y la vegetación herbácea aportan muy poco a la biomasa y al carbono vegetal almacenado en el ecosistema, variando de 3,3% (biomasa) y 2% (C) en el Pacífico Central, a 7,3% (biomasa) y 7,5% (C) en la Zona Norte (cuadro 3).

La fracción de carbono (FC) entre los componentes del árbol, osciló entre 35,9 % (SD=5,3) en hojas, en el Pacífico Central, a 45,6 % en el fuste (SD=4,1) y la raíz (SD=4,3) en las Zonas Altas. En la necromasa gruesa la FC varió de 43,9 % (SD=6,2) a 45,2 % (SD=5,9), en la necromasa fina de 34,2% (SD=3,6) a 37,0% (SD=3,7) y de 35,3% (SD=4,1) a 37,7 % SD=3,7) en la vegetación herbácea. La necromasa fina y la vegetación herbácea presentan los valores más bajos en carbono, y para todos los componentes la FC se estimó con un error máximo de 9,1% (cuadro 4).

3.2. Factores de expansión de la biomasa (FEB) y distribución de la biomasa y el carbono por componente estructural del árbol

El factor de expansión promedio para incluir la biomasa aérea (hojas y ramas) fue más bajo en el Pacífico Central (1,44) y muy similar en las otras zonas (1,54 y 1,56), igual sucede para el FEB para hojas y ramas por separado, lo contrario ocurre con el FEB para la raíz que registró un valor más alto para Pacífico Central (cuadro 5). En todos los casos el FEB fue calculado con un error inferior al 24% y el mayor error se presentó con las hojas, componente que mostró la mayor variabilidad.

El fuste aportó entre el 53,7 y 55,0% de la biomasa total del árbol (54,4% del carbono), seguido por ramas con entre 17,6 y 22,5% (18 a 22% en C), las raíces aportan entre 18 y 24,1% (19,6 a 24,4% en

Cuadro 5. Factores de expansión de la biomasa (FEB) y distribución de la biomasa y el carbono por componente estructural del árbol

Zona	Estadístico*	Hojas	Ramas	Hojas + Ramas	Raíz
Zona Norte	X	1,09	1,44	1,54	1,34
	SD	0,01	0,03	0,33	0,01
	E%	13,6	13,3	4,2	7
	n	105	105	105	105
Pacífico Central	X	1,07	1,36	1,44	1,47
	SD	0,06	0,21	0,26	0,16
	E%	23,3	15, 9	4,9	9, 3
	n	53	55	55	55
Zonas Altas	X	1,09	1,47	1,56	1,43
	SD	0,12	0,37	0,38	0,42
	E%	24,2	15	4,7	18,8
	n	106	106	106	106

Fuente: Elaboración propia.

Nota*: X = Promedio, n = tamaño de la muestra, SD = desviación estándar, E% = error de muestreo.

Cuadro 6. Aporte porcentual del componente del árbol a la biomasa y al carbono total

		Hojas		Ramas		Raíz		Fuste	
Zona	Estadístico*	biomasa	carbono	biomasa	carbono	biomasa	carbono	biomasa	carbono
Zona Norte	X	5,0	4,0	22,1	22,0	18,0	19,6	55,0	54,3
	SD	3,1	2,6	10,8	10,8	5,5	5,9	10,3	10,2
	E%	11,9	12,1	9,3	9,3	5,8	5,7	3,6	3,6
	n	109	109	109	109	109	109	109	109
Pacífico Central	X	4,1	3,4	17,6	18,0	24,1	24,4	54,2	54,3
	SD	3,4	2,8	7,7	7,8	5,7	5,7	9,6	9,5
	E%	22,1	22,4	11,8	11,7	6,4	6,4	4,8	4,7
	n	55	55	55	55	55	55	55	55
Zonas Altas	X	4,4	3,7	22,5	22,1	19,5	19,8	53,7	54,5
	SD	4,9	4,2	11,1	11,0	12,0	12,2	13,0	13,0
	E%	21,2	21,7	9,5	9,6	11,9	11,8	4,6	4,6
	n	106	106	106	106	106	106	106	106

Fuente: Elaboración propia.

Nota*: X = Promedio, n = tamaño de la muestra, SD = desviación estándar, E% = error de muestreo.

C), mientras el follaje tiene un aporte inferior al 5% (4% en C). La mayor concentración de biomasa y carbono en el fuste se presentó en la Zona Norte, con una diferencia mínima de 1,3% en biomasa con respecto a las Zonas Altas. El aporte de la biomasa de raíz en el Pacífico Central superó en un 6,1 y 4,6% a la Zona Norte y Zonas Altas, respectivamente.

Las ramas en la Zona Norte y Zona Altas tienen un comportamiento muy similar, representando aproximadamente el 22% de la biomasa o el carbono del árbol, un 4% superior al Pacífico Central (cuadro 6).

3.3. Modelos para estimar biomasa y carbono

3.3.1 Zona Norte

Los modelos de biomasa y carbono para componentes estructurales del árbol o árbol completo presentan una precisión aceptable, con un coeficiente de determinación (R^2) ≥ 78,7% (P<0.0001) y errores de estimación inferiores al 22,7%. Para el árbol completo (B-Ctotal) y el componente leñoso (B-Cleñoso), el R^2 fue superior al 91,6%. El menor ajuste se presentó en carbono de ramas (Cramas), raíz (Craíz), biomasa y carbono en hojas (B-Chojas), con R^2 que van desde 78,7 a 88,3% (cuadro 7, figura 3).

El error estándar de los estimados (RCME) y error medio absoluto (EMA) para todos los modelos, fue inferior a 0,66 y 0,54, respectivamente, excepto para Bramas con 2,5 y 1,98. El error de predicción o sesgo (E%) fue inferior a 10%, excepto para Bramas, Cramas y Chojas con 22,7; 12,5 y 18,5%, respectivamente (cuadro 7).

Cuadro 7. Modelos para estimar biomasa (kg) y carbono (kg) para distintos componentes del árbol y para el árbol completo, en la Zona Norte de Costa Rica

Modelo	R2	RCME	EMA	DW	n	ECM	DA	IF	E%	AIC
Btotal = exp(-2,30162 + 2,48713*ln(Dap))	93,5	0,414	0,3314	1,9680 (P=0,396)	100	585,5	106,5	87,0	9,4	6,0
Ctotal = exp(-3,10233 + 2,48972*ln(Dap))	93,4	0,416	0,332	1,9752 (P=0,410)	100	257,2	45,7	45,0	9,0	5,6
Bleñosa = exp(-2,27691 + 2,44957*ln(Dap))	91,6	0,462	0,370	1,8459 (P=0,217)	103	646,2	136,4	101,5	6,8	6,5
Cleñoso = exp(-3,06415 + 2,45077*ln(Dap))	91,6	0,464	0,371	1,8468 (P=0,219)	103	294,6	62,3	46,5	6,9	5,7
Bfuste = exp(-2,461 + 2,32675*ln(Dap))	89,4	0,498	0,405	1,8199 (P=0,178)	103	375,0	76,9	61,9	9,9	5,9
Cfuste = exp(-3,26762 + 2,32724*ln(Dap))	89,4	0,498	0,405	1,8205 (P=0,179)	103	168,0	35,6	28,0	8,5	5,2
Bramas = (2,88051 + 0,00639482*Dap^2)^2	92,1	2,503	1,98	1,6283 (P=0,028)	97	101,6	24,3	145,5	22,7	4,6
Cramas = exp(-1,96181 + 1,01157*√(Dap))	78,7	0,662	0,540	1, 700 (P=0,055)	97	158,6	1765,8	10,8	12,5	5,1
Braíz = exp(-4,142 + 2,51704*ln(Dap))	88,3	0,561	0,451	1,8330 (P=0,201)	102	112,0	27,4	19,6	7,6	4,7
Craíz = exp(-4,59333 + 2,40953*ln(Dap))	84,8	0,612	0,504	1,7936 (P=0,149)	102	19,0	73,5	6,7	6,9	3,0
Bhojas = exp(-2,39123 + 0,932044*√Dap)	81,6	0,631	0,491	1,4725 (P=0,004)	101	39,8	0,6	5,0	9,1	3,7
Chojas = (0,920657 + 0,00161672*Dap^2)^2	92,0	0,607	0,459	1,643 (P=0,033)	92	8,9	1,0	2,6	18,5	2,2

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ln = logaritmo natural, exp = exponente. Todos los modelos poseen una P<0,0001.

El estadístico de Durbin-Watson (DW) que se utiliza para detectar la presencia de autocorrelación en los residuos (errores de predicción), varió entre 1,47 (Bhojas) y 1,97 (Btotal), lo que sugiere que no hay subestimación del nivel de significación estadística. Los demás estadísticos, Índice de Furnival (IF), Criterio de Información de AkaiKe (AIC), Error cuadrático medio (ECM) y Diferencia agregada (DA), muestran cifras bajas (cuadro 7).

Los modelos agregados para estimar biomasa y carbono por hectárea, presentaron un ajuste que osciló entre 91,4% (Btotal) a 98,5% (Chojas), con errores o sesgos entre -7,5% (Chojas) y 4,2% (Btotal). El Error estándar de los estimados (RCME) y Error medio absoluto (EMA) para todos los modelos fue inferior a 0,22 y 0,14, respectivamente, excepto para Btotal con 22,76 y 11,72 y Ctotal con 22,53 y 9,06. El DW varió de 1,4368 (Carbóreo) a 2,1681 (Chojas) (cuadro 8, figura 4).

Cuadro 8. Modelos para estimar biomasa (Mg) y carbono (Mg) por hectárea en la Zona Norte de Costa Rica

Modelo	R2	RCME	EMA	DW	n	ECM	DA	IF	E%	AIC
Btotal = 17,088 + 8,30418*G	91,4	29,760	22,528	1,7453 (P=0,137)	55	29,2	0,0	29,8	4,2	3,4
Ctotal = 5,02746 + 3,74799*G	93,3	11,718	9,060	1,6181 (P=0,057)	55	11,5	109,0	11,7	2,8	2,5
Log(Barbórea) = (1,40886 + 0,272738*ln(G))^2	97,9	0,033	0,0262	1,6650 (P=0,081)	55	26,28	0,14	9,3	0,9	3,3
Carbóreo = exp(0,999171 + 1,06795*ln(G))	97,4	0,143	0,118	1,4368 (P=0,011)	55	10,7	1,8	8,1	1,0	2,4
Bleñosa = exp(1,7895 + 1,0399*ln(G))	97,9	0,126	0,102	1,5671 (P=0,038)	55	18,0	2,2	14,4	0,8	2,9
Cleñoso = exp(1,01097 + 1,04269*ln(G))	97,9	0,125	0,102	1,5869 (P=0,045)	55	8,3	1,0	6,6	0,8	2,2
Bfuste = exp(1,40527 + 0,9606*ln(G))	98,1	0,111	0,089	1,5069 (P=0,022)	55	8,6	1,0	6,9	0,6	3,4
Cfuste = exp(0,598943 + 0,960967*ln(G))	98,1	0,111	0,089	1,5099 (P=0,023)	55	3,8	0,5	3,1	0,6	1,4
Bramas = exp(-0,0707154 + 1,21353*ln(G)	96,3	0,197	0,161	1,7766 (P=0,165)	55	8,3	1,3	5,8	1,9	2,1
Cramas = exp(-0,882733 + 1,21799*ln(G))	96,3	0,196	0,162	1,7746 (P=0,163)	55	3,7	0,6	2,6	1,9	1,4
Braíz = exp(0,0813281 + 1,06645*ln(G))	97,6	0,139	0,110	2,0895 (P=0,578)	55	5,2	0,1	3,1	0,9	1,7
Craíz = exp(-0,577401 + 1,07057*ln(G))	97,6	0,140	0,109	2,0666 (P=0,544)	55	2,7	0,0	1,6	1,0	1,1
Bhojas = 1/(0,0145143 + 2,97339/G)	98,0	0,0841	0,054	2,1420 (P=0,655	55	24,2	9,0	0,08	-7,6	3,2
Chojas = 1/(-0,00942699 + 8,99883/G)	98,5	0,220	0,138	2,1681 (P=0,690)	55	8,7	3,2	0,22	-6,7	2,2

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ln = logaritmo natural, exp = exponente. Todos los modelos poseen una P<0,0001.

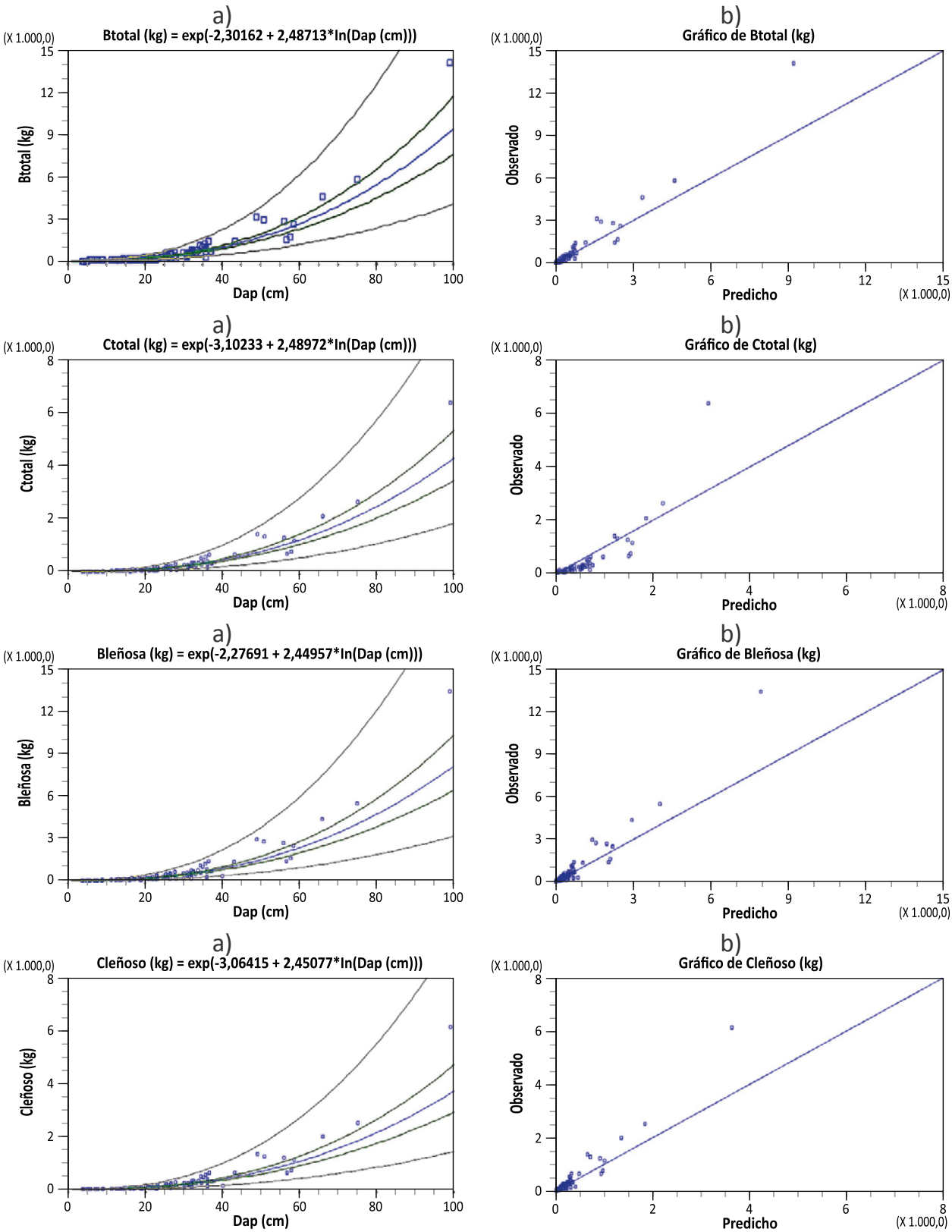


Figura 3. Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo en la Zona Norte de Costa Rica: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos *vs* observados.

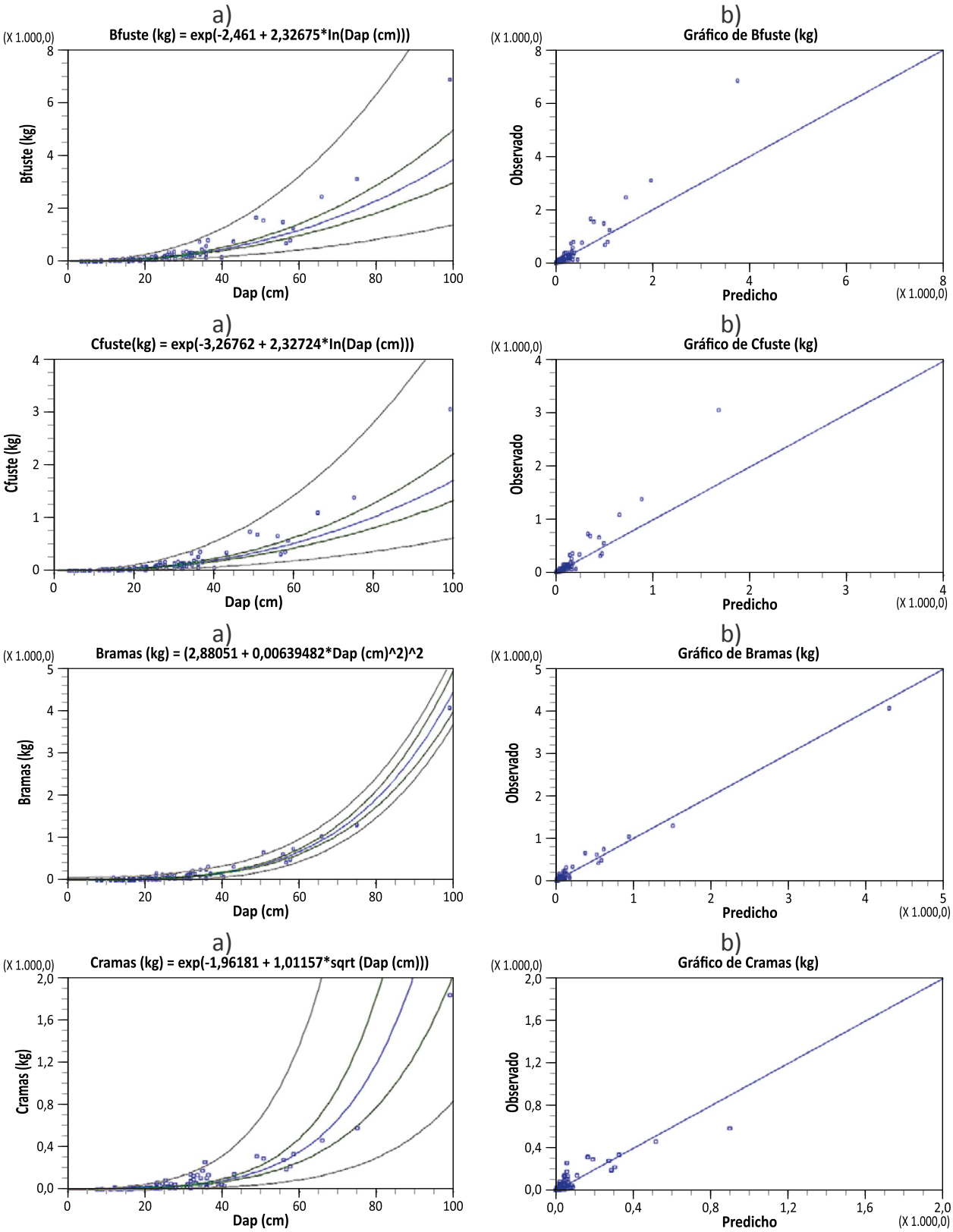


Figura 3. Continuación.

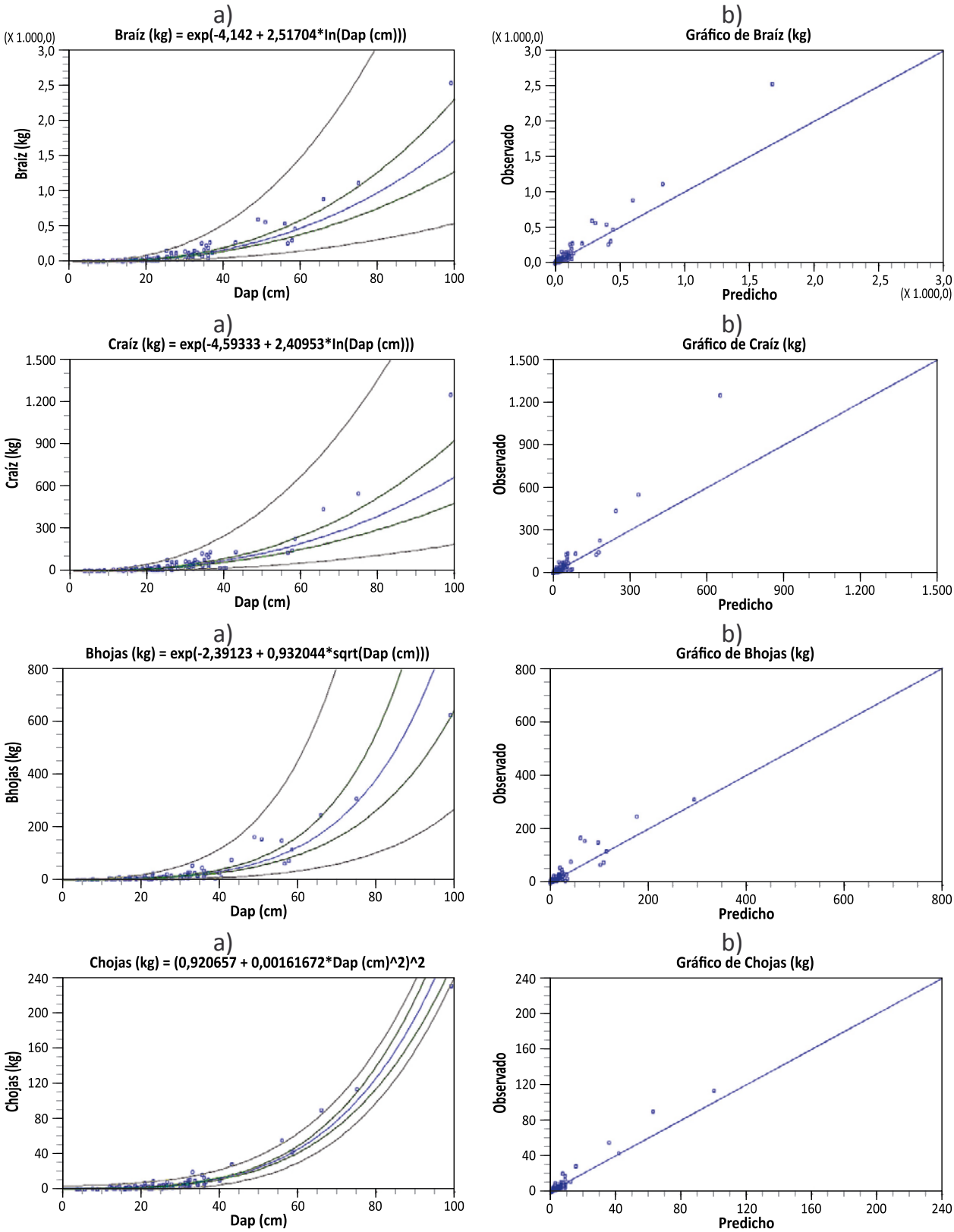


Figura 3. Continuación.

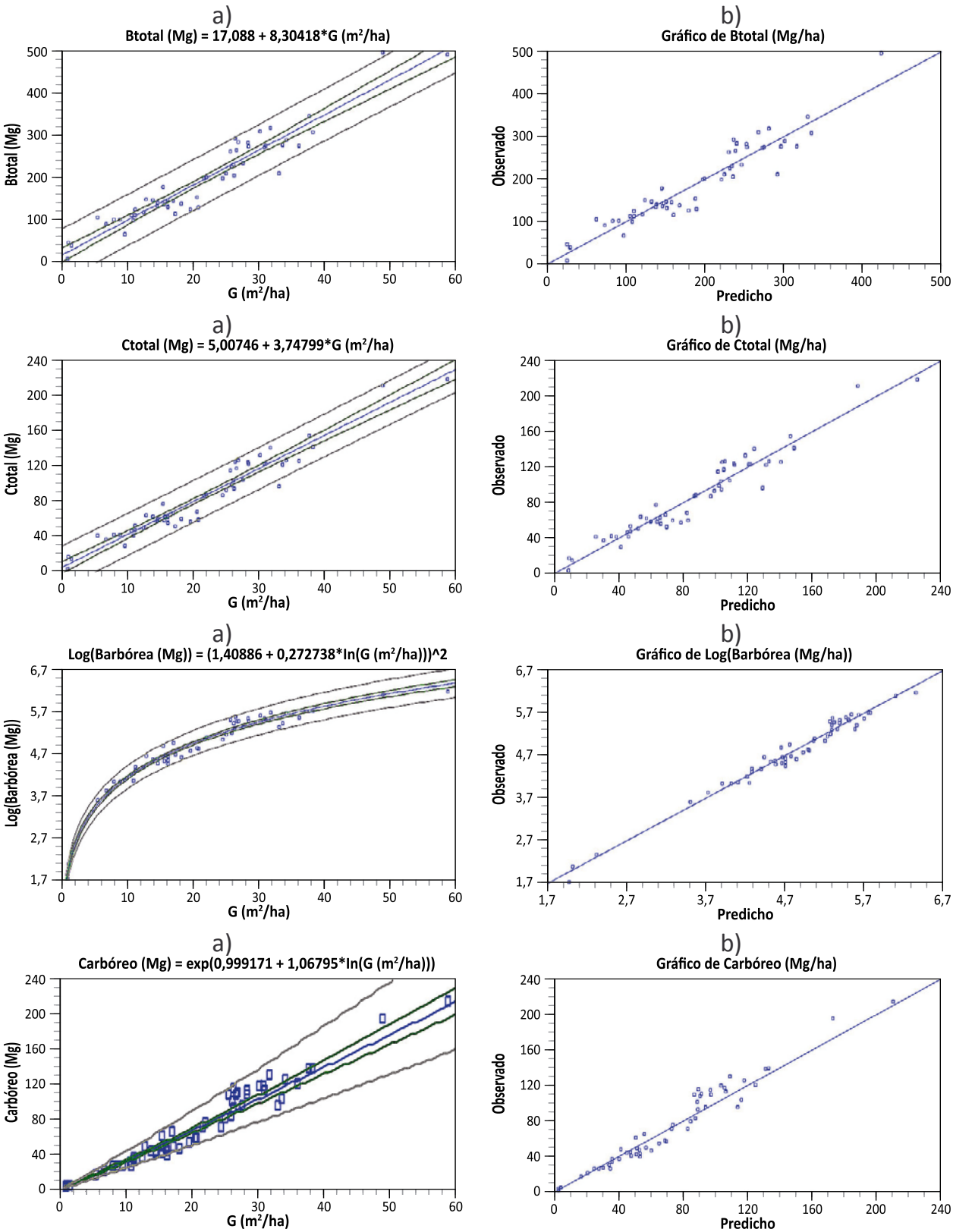


Figura 4. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en la Zona Norte de Costa Rica: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos *vs* observados.

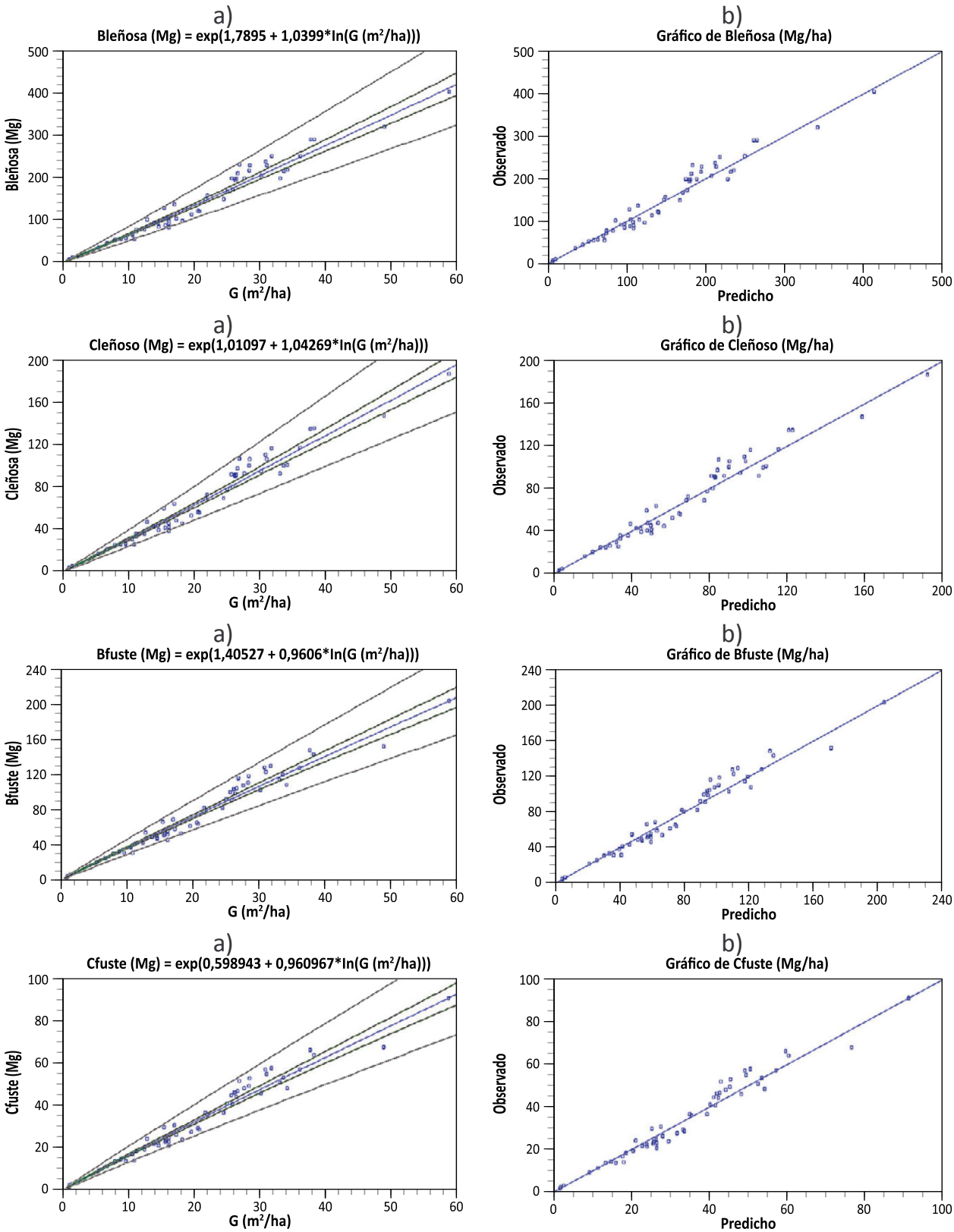


Figura 4. Continuación.

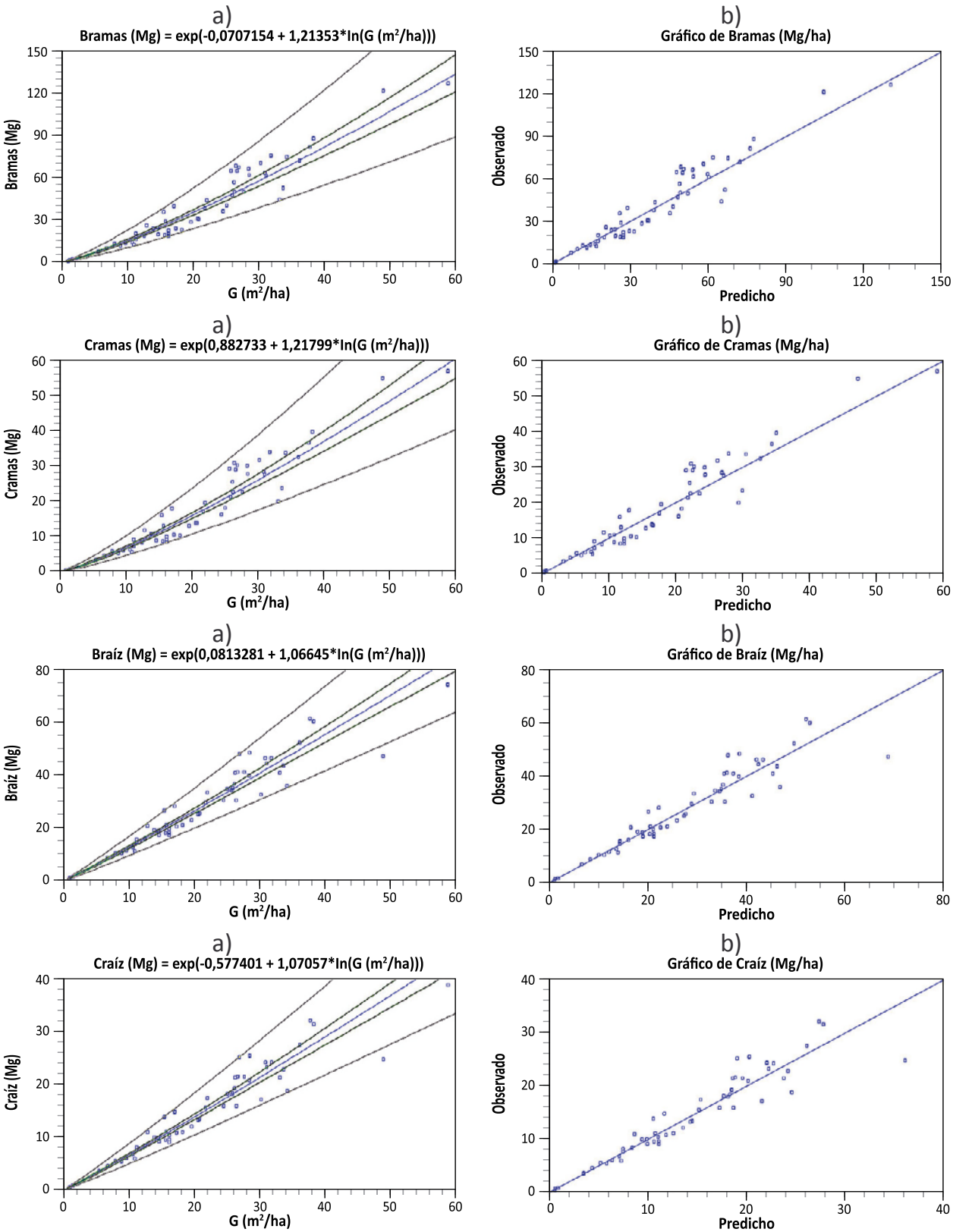


Figura 4. Continuación.

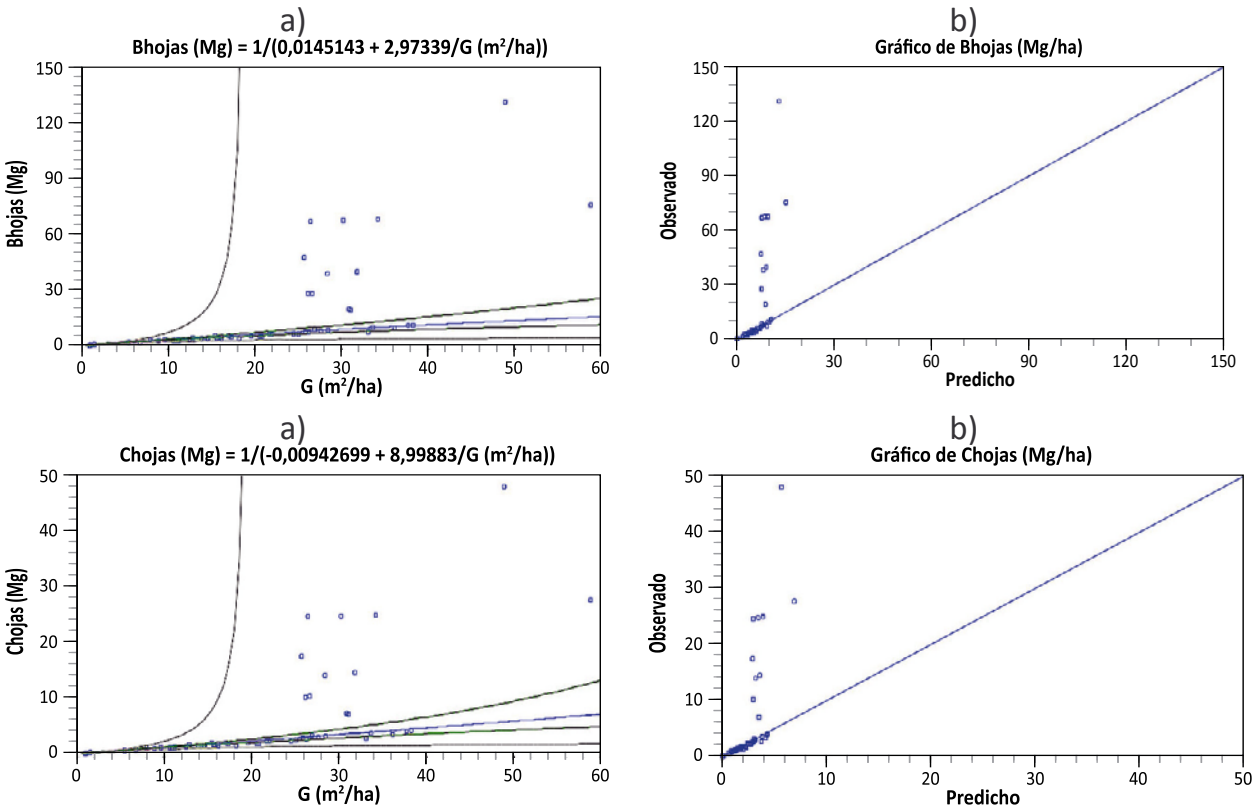


Figura 4. Continuación.

3.3.2 Zona Pacífico Central

Los modelos de biomasa y carbono para componentes estructurales del árbol o árbol completo, presentan una precisión aceptable, con un coeficiente de determinación (R^2) ≥ 92,6% (P<0.0001) y errores de estimación o sesgos (E%) inferiores al 10,6%, el menor ajuste y el error más alto se presentó para el follaje. El RCME y EMA para todos los modelos fue inferior a 0,414 y 0,33, respectivamente, excepto para Bhojas y Chojas con 1,09 y 1,69, respectivamente (cuadro 9). El estadístico DW varió entre 1,4766 (Bramas) y 1,8391 (Cfuste), lo que sugiere que no hay subestimación del nivel de significación estadística. Los demás estadísticos (IF, AIC, ECM, DA) muestran cifras bajas (cuadro 9, figura 5).

Los modelos agregados presentaron un ajuste que osciló entre 90,4% (Bhojas) a 95,9% (Bfuste), con errores o sesgos entre -1,8% (Chojas) y 1,1% (Bramas). El RCME y EMA para todos los modelos fue inferior a 0,14 y 0,11, respectivamente. La prueba de DW osciló entre 2,4812 (Chojas) a 2,7222 (Cleñoso) (cuadro 10, figura 6).

Cuadro 9. Modelos para estimar biomasa (kg) y carbono (kg) para distintos componentes del árbol y para el árbol completo, en la Zona Pacífico Central de Costa Rica

Modelo	R2	RCME	EMA	DW	n	ECM	DA	IF	E%	AIC
Btotal = exp(-1,6203 + 2,30583*ln(Dap))	97,4	0,328	0,265	1,8251 (P=0,198)	75	769,3	28,7	85,8	5,5	6,7
Ctotal = exp(-2,45614 + 2,30938*ln(Dap))	97,4	0,328	0,266	1,8262 (P=0,200)	75	338,2	11,8	38,8	5,4	5,8
Bleñosa = exp(-1,70336 + 2,32004*ln(Dap))	97,4	0,330	0,268	1,8367 (P=0,213)	75	748,7	20,8	83,1	5,6	6,6
Cleñoso = exp(-2,52323 + 2,32079*ln(Dap))	97,4	0,330	0,268	1,8378 (P=0,214)	75	330,8	9,1	63,7	5,4	5,8
Bfuste = exp(-2,24847 + 2,30269*ln(Dap))	96,6	0,376	0,293	1,8362 (P=0,212)	75	400,1	6,2	52,0	7,3	6,0
Cfuste = exp(-3,07211 + 2,30275*Log(Dap))	96,6	0,374	0,292	1,8391 (P=0,216)	75	175,6	2,7	22,7	7,3	5,2
Bramas = exp(-3,74395 + 2,44992*ln(Dap))	96,5	0,415	0,337	1,4766 (P=0,010)	70	175,8	-1,5	18,8	8,9	5,2
Cramas = exp(-4,51985 + 2,44115*ln(Dap))	96,5	0,414	0,336	1,5112 (P=0,014)	70	78,1	0,1	8,4	9,3	4,4
Braíz = exp(-3,09024 + 2,31665*ln(Dap))	97,4	0,332	0,270	1,7921 (P=0,169)	69	192,2	6,3	20,3	5,4	5,3
Craíz = exp(-3,81941 + 2,29512*ln(Dap))	97,2	0,338	0,274	1,7974 (P=0,171)	69	84,1	4.0	9,2	5,0	4,4
Bhojas = (-0,212718 + 0,147059*Dap)^2	93,0	1,109	0,757	1,6390 (P=0,052)	69	23,5	0,9	10,4	10,6	3,2
Chojas = (-0,293666 + 0,0898427*Dap)^2	92,6	0,690	0,489	1,7170 (P=0,096)	69	8,2	0,7	0,7	1,7	2,2

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ln = logaritmo natural, exp = exponente. Todos los modelos poseen una P<0,0001.

Cuadro 10. Modelos para estimar biomasa (Mg) y carbono (Mg) por hectárea en la Zona Pacífico Central de Costa Rica

Modelo	R2	RCME	EMA	DW	n	ECM	DA	IF	E%	AIC
Btotal = 1/(0,000450933 + 0,108525/G)	93,2	0,001	0,000	2,4853 (P=0,951)	50	67,0	19,4	0,0	-1,4	4,2
Ctotal = 1/(0,000411285 + 0,181226/G)	93,8	0,001	0,001	2,5923 (P=0,980)	50	41,4	11,5	0,0	-1,2	3,7
Barbórea = 1/(-0,000281847 + 0,139437/G)	95,7	0,001	0,000	2,7053 (P=0,994)	50	52,0	4,4	0,0	0,2	4,0
Carbóreo = 1/(-0,000319492 + 0,212027/G)	95,2	0,001	0,001	2,7224 (P=0,995)	50	35,0	5,2	0,0	-0,2	3,6
Bleñosa = 1/(-0,000352692 + 0,146729/G)	95,7	0,001	0,000	2,6795 (P=0,992)	50	51,6	2,8	0,0	0,4	4,0

Cuadro 10. Continuación

Cleñoso = 1/(-0,000359527 + 0,217524/G)	95,2	0,010	0,001	2,7168 (P=0,995)	50	34,4	4,8	0,0	-0,1	3,6
Bfuste = 1/(-0,000506225 + 0,23163/G)	95,9	0,001	0,001	2,6459 (P=0,988)	51	31,3	1,5	0,0	0,4	3,5
Cfuste = 1/(-0,00121635 + 0,529762/G)	95,9	0,002	0,002	2,6359 (P=0,987)	51	13,8	0,5	0,0	0,5	2,6
Bramas = 1/(-0,00245005 + 0,631028/G)	95,5	0,003	0,002	2,7091 (P=0,994)	50	15,3	-0,4	0,0	1,1	2,8
Cramas = 1/(-0,00611136 + 1,59794/G)	91,5	0,010	0,007	2,6674 (P=0,991)	50	6,9	1,0	0,0	-0,0	2,0
Braíz = 1/(-0,0000885812 + 1,078/G)	94,4	0,005	0,004	2,6481 (P=0,989)	50	6,8	1,5	0,0	-0,7	2,0
Craíz = 1/(-0,0000943111 + 0,480678/G)	94,5	0,002	0,002	2,6515 (P=0,989)	50	15,3	3,4	0,0	0,7	2,8
Bhojas = exp(-1,13883 + 0,961493*ln(G))	90,4	0,137	0,106	2,5502 (P=0,970)	50	1,6	0,1	24,2	0,8	0,5
Chojas = 1/(0,0490785 + 8,41394/G)	93,1	0,046	0,034	2,4812 (P=0,949)	50	0,8	0,2	0,05	-1,8	-0,2

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ln = logaritmo natural, exp = exponente. Todos los modelos poseen una P<0,0001.

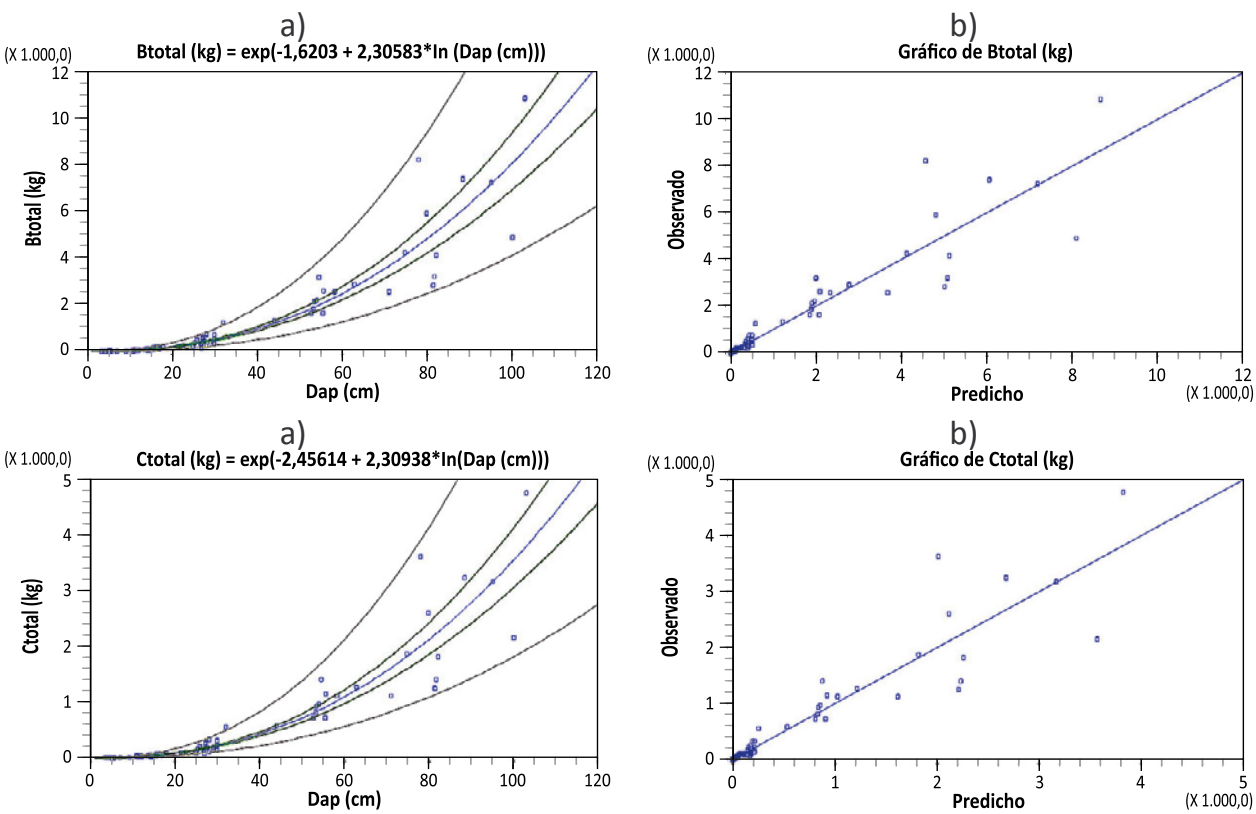


Figura 5. Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo en el Zona Pacífico Central de Costa Rica: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos *vs* observados.

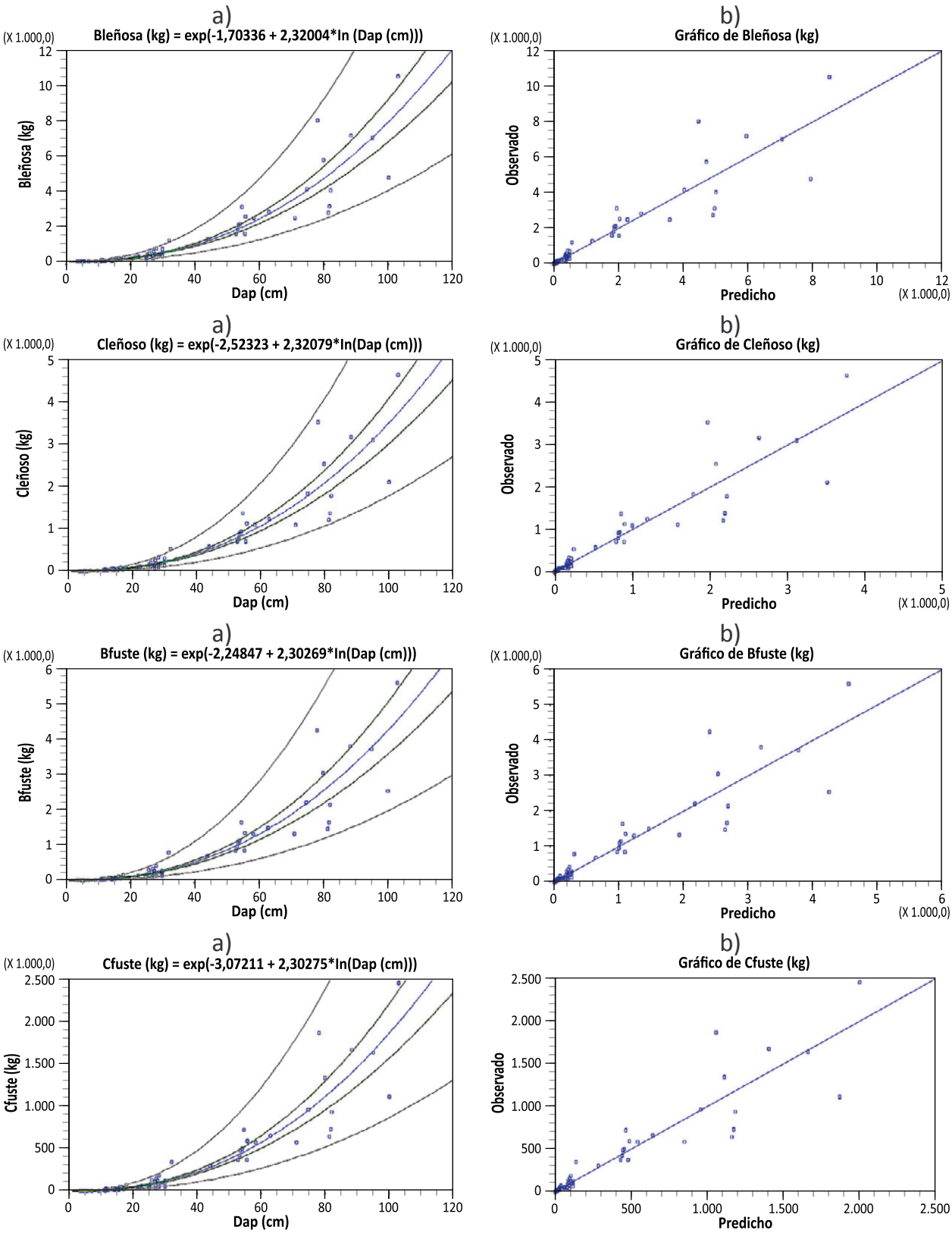


Figura 5. Continuación.

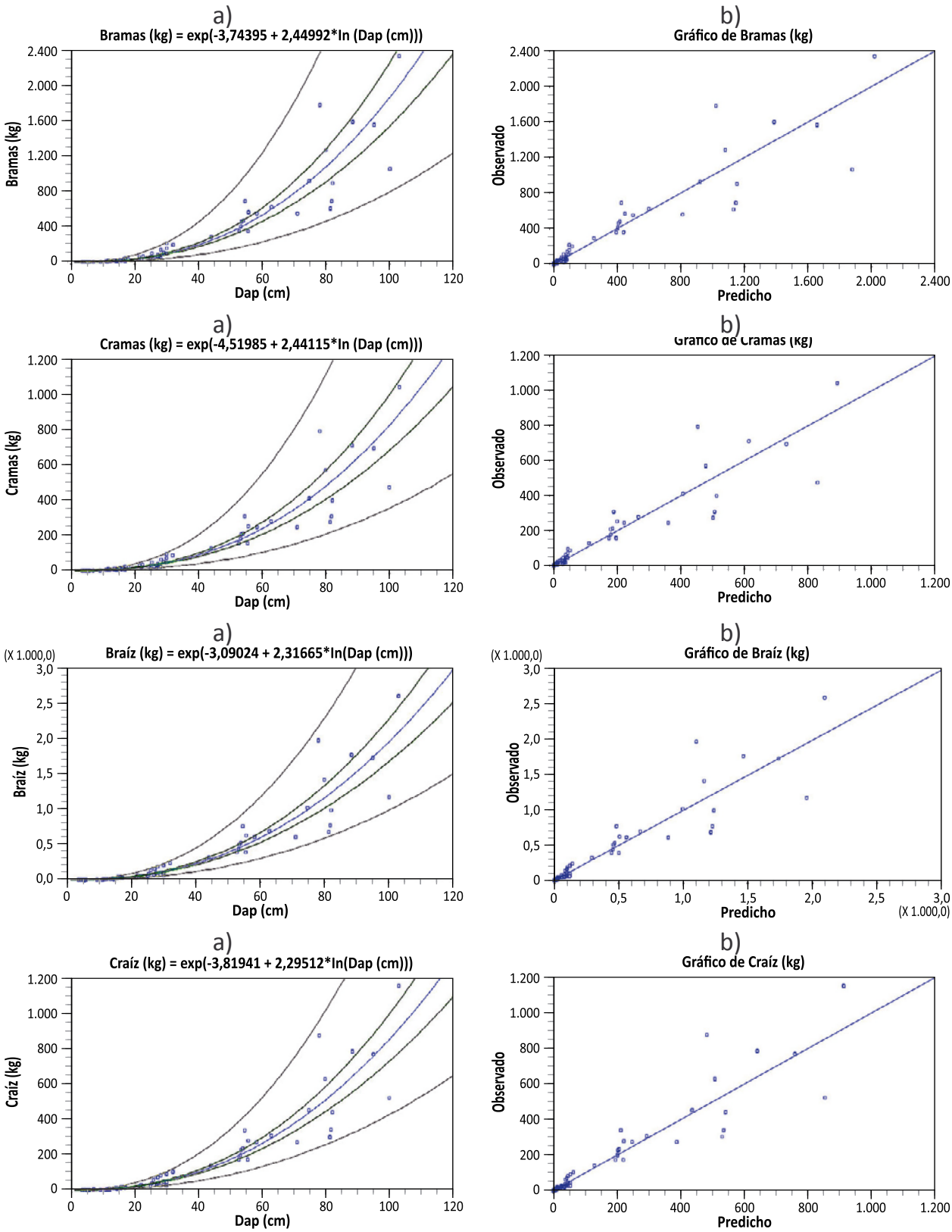


Figura 5. Continuación.

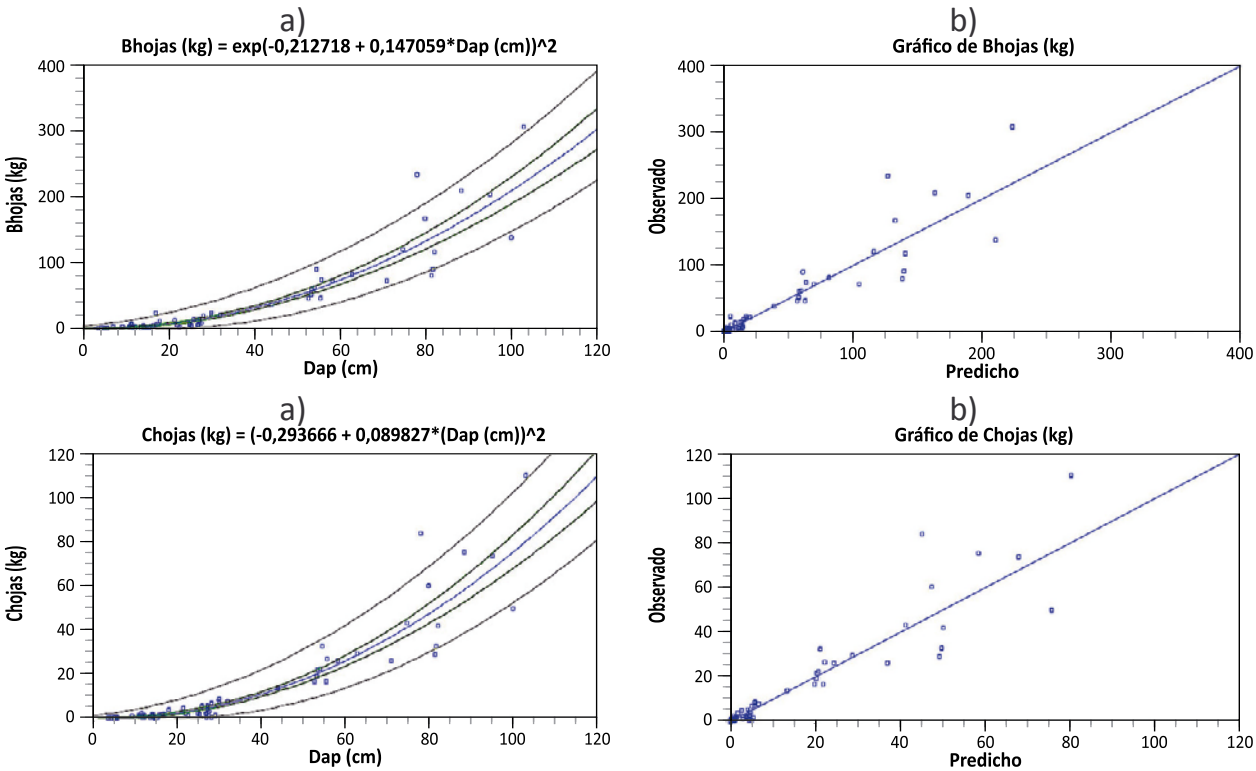


Figura 5. Continuación.

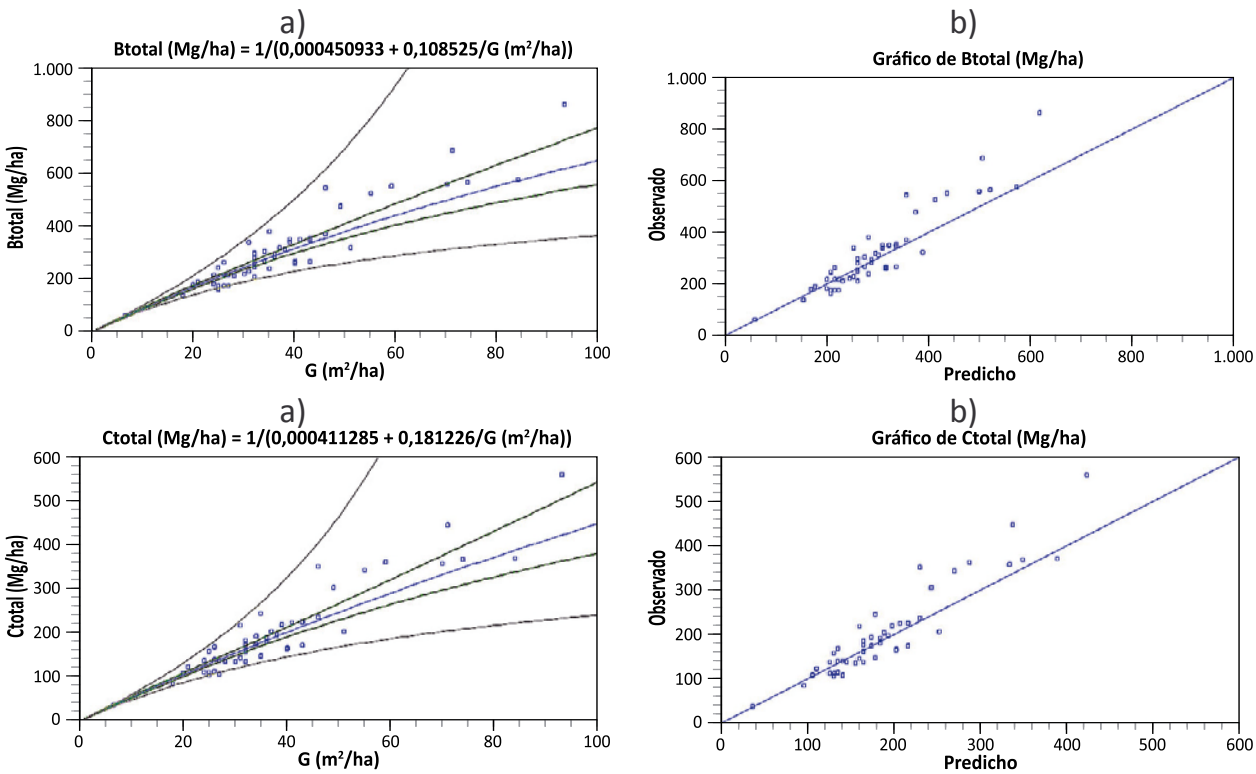


Figura 6. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en el Pacífico Central de Costa Rica: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos *vs* observados.

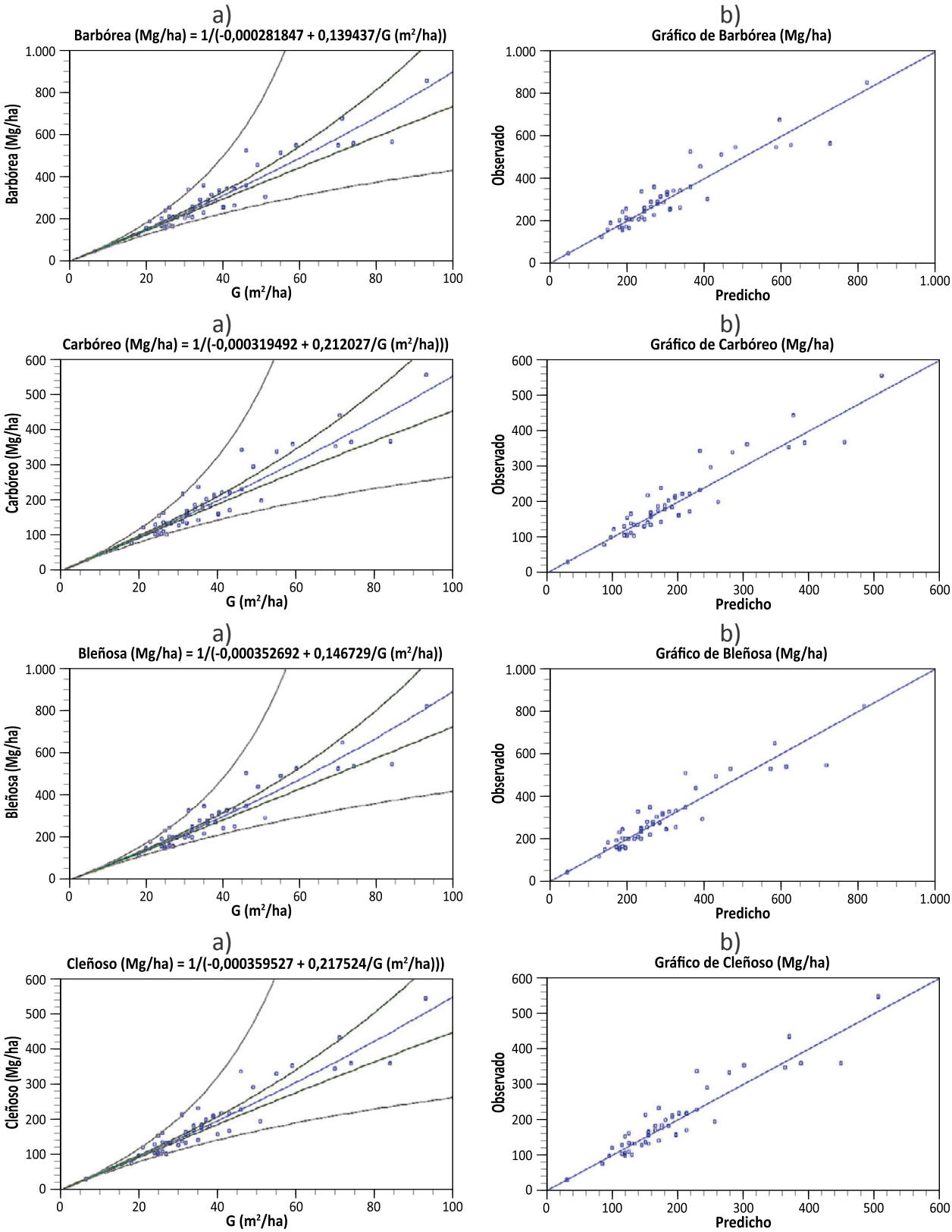


Figura 6. Continuación.

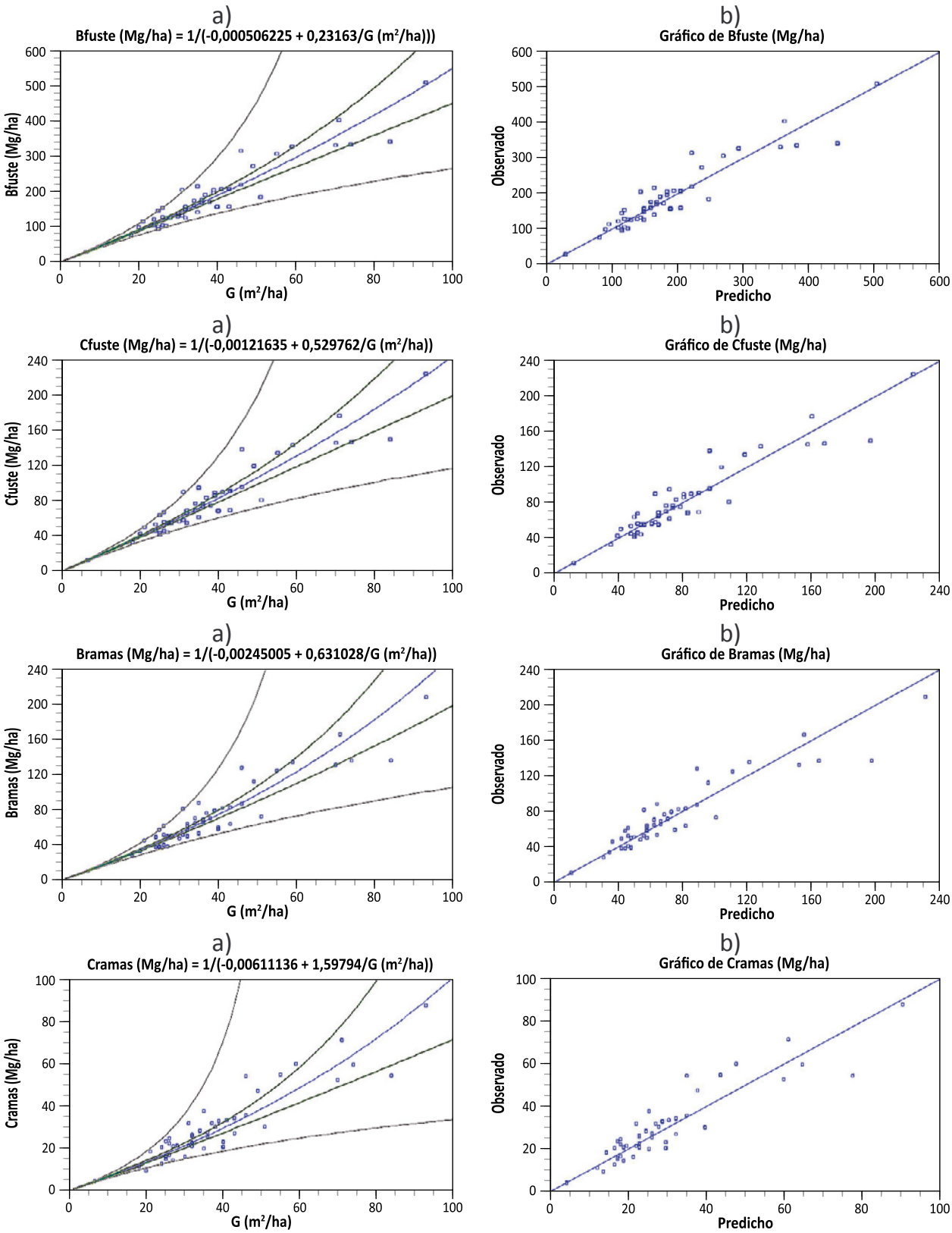


Figura 6. Continuación.

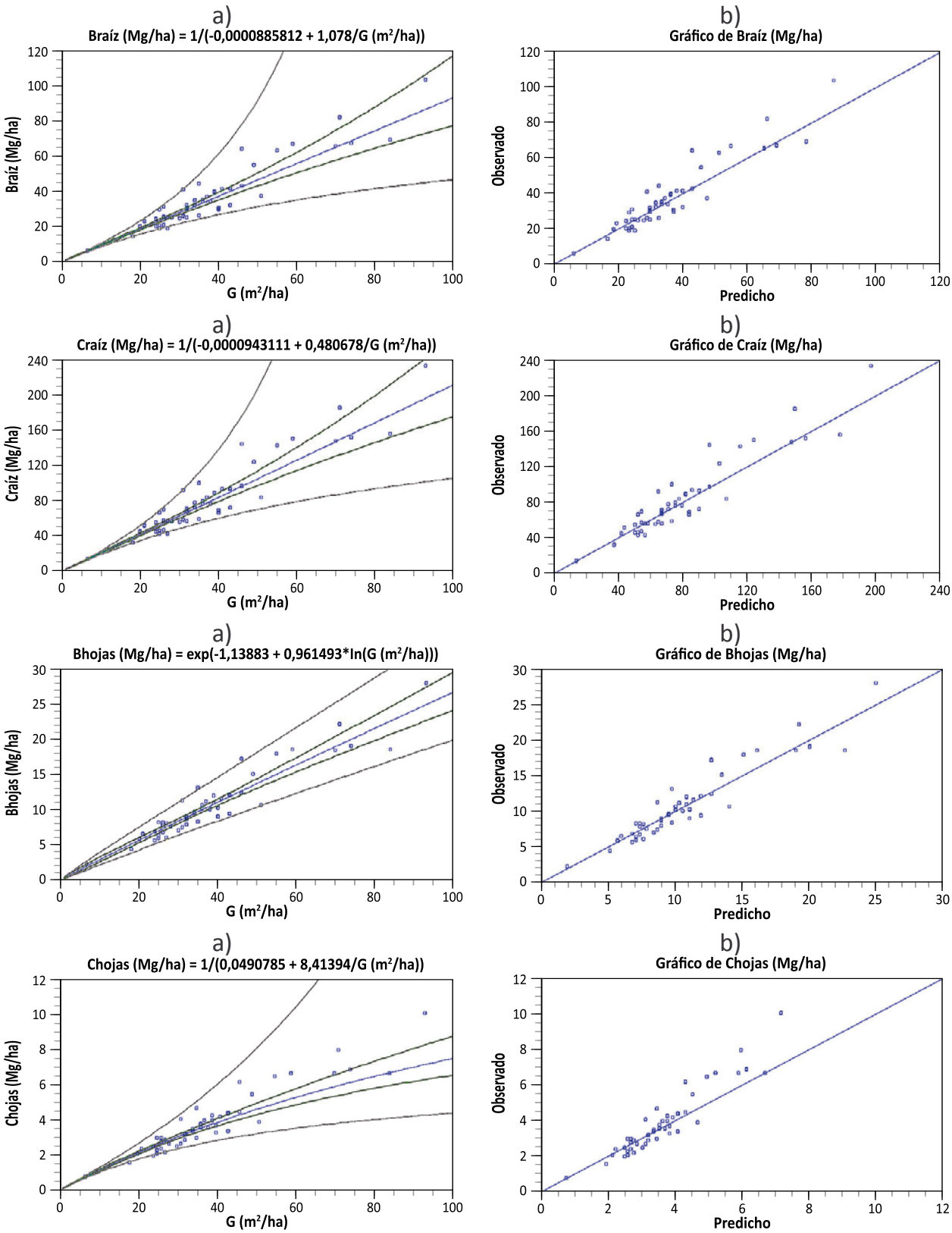


Figura 6. Continuación.

3.3.3 Zonas Altas

Los modelos de biomasa y carbono para componentes estructurales del árbol o árbol completo, presentan una precisión aceptable, con un $R^2 \geq 81,0\%$ (P<0.0001) y errores de estimación inferiores al 21,43%. El menor ajuste se presentó para Chojas y el error más alto para Braíz. El RCME y EMA para todos los modelos fue inferior a 0,59 y 0,45 (B-Cramas), respectivamente, excepto para Bhojas y Chojas con 1,073 y 0,57. La prueba de DW varió entre 1,7727 (Cramas) y 2,176 (Chojas), lo que sugiere que no hay subestimación del nivel de significación estadística. El error de predicción varió entre 6,5 y 9,7% para B-Ctotal, B-Cleñosa, B-Cfuste y B-Cramas, y entre 10,8 y 21,4% para B-Craíz y B-Chojas. Los demás estadísticos (IF, AIC, ECM, DA) muestran cifras bajas (cuadro 11, figura 7).

En los modelos agregados el ajuste osciló entre 80,6% (Chojas) y 96,3 % (B-Cfuste), con errores o sesgos inferiores a 6,5% (Chojas). El RCME y EMA para todos los modelos fue inferior a 0,174 y 0,129, respectivamente, excepto para B-Chojas con un RCME de 1,179 y 0,283 y un EMA de 0,97 y 064. La prueba de DW osciló entre 1,6137 (Chojas) a 2,048 (Craíz) (cuadro 12, figura 8).

Cuadro 11. Modelos para estimar biomasa (kg) y carbono (kg) para distintos componentes del árbol y para el árbol completo, en bosques de Zonas Altas en Costa Rica

Modelo	R2	RCME	EMA	DW	n	ECM	DA	IF	E%	AIC
Btotal = exp(-1,80211 + 2,30969*ln(Dap))	94,3	0,433	0,329	2,0191 (P=0,546)	146	478,4	9,0	96,7	7,2	6, 2
Ctotal = exp(-2,59151 + 2,31262*ln(Dap))	95,0	0,408	0,314	1,8898 (P=0,255)	144	221,0	0,2	47,9	7,8	5,4
Bleñosa = exp(-1,83452 + 2,31255*ln(Dap))	95,0	0,410	0,316	1,8594 (P=0,200)	144	474,5	-3,5	104,1	7,7	6,2
Cleñoso = exp(-2,63734 + 2,31606*ln(Dap)	95,4	0,419	0,320	1,8852 (P=0,246)	144	302,9	19,7	52,4	6,5	5,7
Bfuste = exp(-2,87065 + 2,47753*ln(Dap))	94,3	0,467	0,364	1,8343 (P=0,161)	144	374,2	15,0	61,1	8,6	5,9
Cfuste = exp(-3,64621 + 2,47481*ln(Dap))	94,3	0,467	0,364	1,8325 (P=0,158)	144	168,2	7,2	28,8	8,5	5,1
Bramas = exp(-3,74417 + 2,47169*ln(Dap))	90,8	0,586	0,453	1,7360 (P=0,057)	142	165,8	33,4	12,5	9,7	5,1
Cramas = exp(-4,50249 + 2,46046*ln(Dap))	91,8	0,549	0,433	1,7727 (P=0,089)	142	73,8	13,6	17,1	12,8	4,3
Braíz = exp(-4,41842 + 2,64678*ln(Dap)	94,7	0,494	0,402	1,8212 (P=0,160)	124	221,2	-11,7	31,6	12,0	5,4
Craíz = exp(-5,17906 + 2,63993*ln(Dap)	94,7	0,491	0,400	1,8011 (P=0,134)	124	100,8	-4,8	14,4	10,8	4,6
Bhojas = exp(-4,426 + 2,09835*ln(Dap))	86,9	0,639	0,451	2,0122 (P=0,527)	129	33,8	5,4	6,6	14,2	3,5
Chojas = (-0,133618 + 0,0894084*Dap^2	81,0	1,073	0,565	2,1760 (P=0,841)	129	12,8	1,4	0,5	21,4	2,6

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ln = logaritmo natural, exp: exponente. Todos los modelos poseen una P<0,0001.

Cuadro 12. Modelos para estimar biomasa (Mg) y carbono (Mg) por hectárea en bosques de Zonas Altas de Costa Rica

Modelo	R2	RCME	EMA	DW	n	ECM	DA	IF	E%	AIC
Btotal = exp(1,7134 + 1,19625*ln(G))	90,7	0,174	0,129	1,7800 (P=0,173)	55	77,5	5,4	68,3	1, 5	4,4
Ctotal = exp(0,920639 + 1,18498*ln(G))	91,2	0,167	0,124	1,7701 (P=0,163)	55	32,7	2,2	28,6	1,3	3,5
Barbórea = 1/(0,000161016 + 0,0769054/G)	89,8	0,000	0,000	1,7174 (P=0,120	55	73,0	16,6	0,0	-0,5	4,3
Carbóreo = 1/(0,000526013 + 0,168966/G)	89,9	0,001	0,001	1,6621 (P=0,083)	55	31,64	7,3	0,0	-0,6	3,5
Bleñosa = exp(1,60009 + 1,14421*ln(G))	95,5	0,113	0,085	1,9964 (P=0,449)	55	35,5	1,8	32,9	0,6	5,6
Cleñoso = exp(0,807588 + 1,14408*ln(G))	95,5	0,113	0,085	1,9990 (P=0,453)	55	16,0	0,8	14,9	0,6	2,8
Bfuste = exp(1,14308 + 1,10934*ln(G))	96,3	0,098	0,076	2,0362 (P=0,509)	55	17,5	0,8	16,0	0,5	2,9
Cfuste = exp(0,358013 + 1,10929*ln(G))	96,3	0,098	0,076	2,0339 (P=0,505)	55	8,0	0,4	7,3	0,5	2,1
Bramas = exp(0,0683836 + 1,16508*ln(G))	93,3	0,142	0,109	1,8736 (P=0,278)	55	10,2	0,8	9,7	1,0	2,3
Cramas = exp(-0,752802 + 1,16574*ln(G))	93,3	0,142	0,109	1,8718 (P=0,275)	55	4,5	0,3	4,2	1,0	1,5
Braíz = exp(-0,23538 + 1,21789*ln(G))	94,9	0,128	0,092	2,0442 (P=0,521)	55	8,3	0,3	7,8	0,8	2,1
Craíz = exp(-1,01919 + 1,21754*ln(G))	94,9	0,128	0,092	2,0480 (P=0,526)	55	3,8	0,1	3,5	0,8	1,4
Bhojas = (-5,12568 + 2,38247*√(G))^2	86,7	1,179	0,970	1,7205 (P=0,136)	47	24,2	1,5	1,2	3,9	3,2
Chojas = (-2,7743 + 1,3906*√(G))^2	80,6	0,823	0,642	1,6137 (P=0,070)	47	10,2	0,6	0,8	6,5	2,3

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ln = logaritmo natural, exp = exponente. Todos los modelos poseen una P<0,0001.

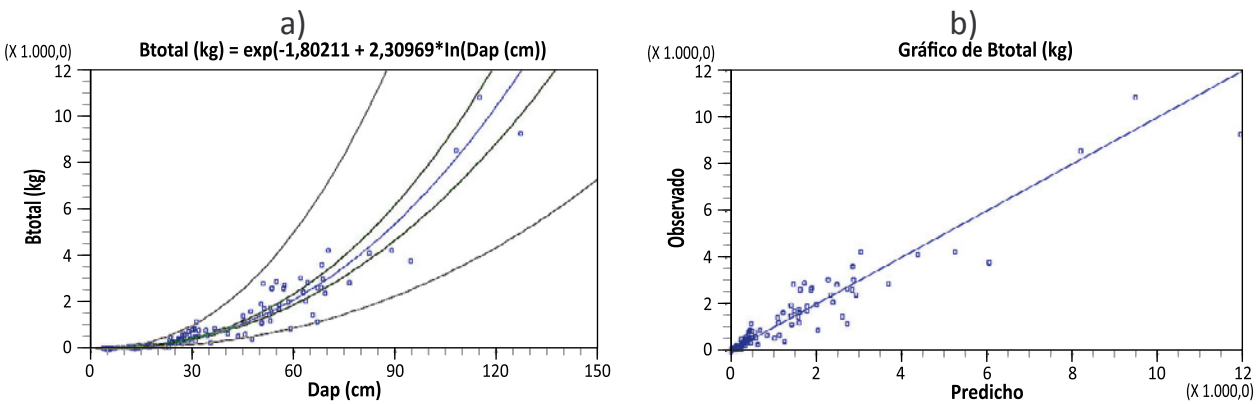


Figura 7. Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo en bosques de Zonas Altas de Costa Rica: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos *vs* observados.

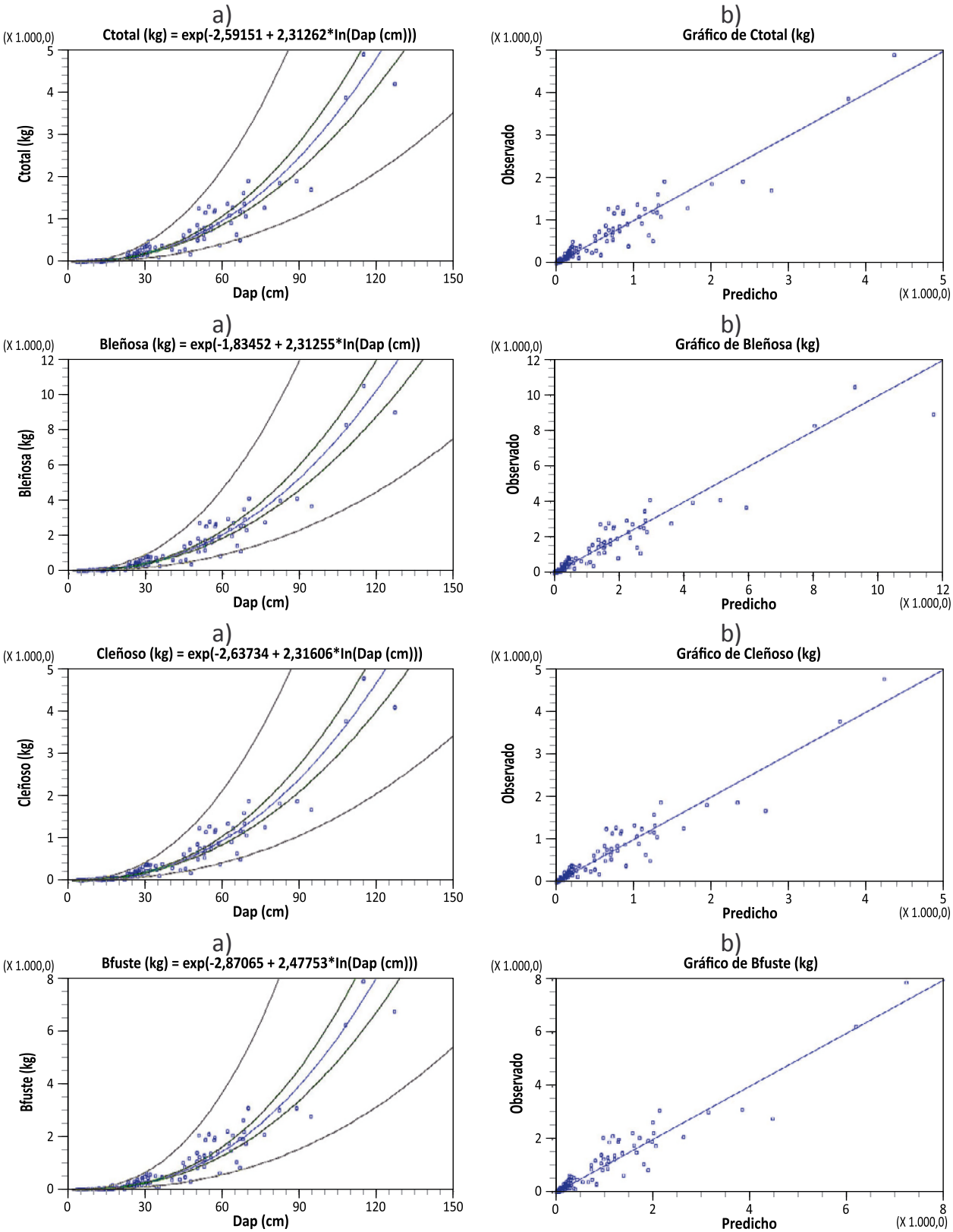


Figura 7. Continuación.

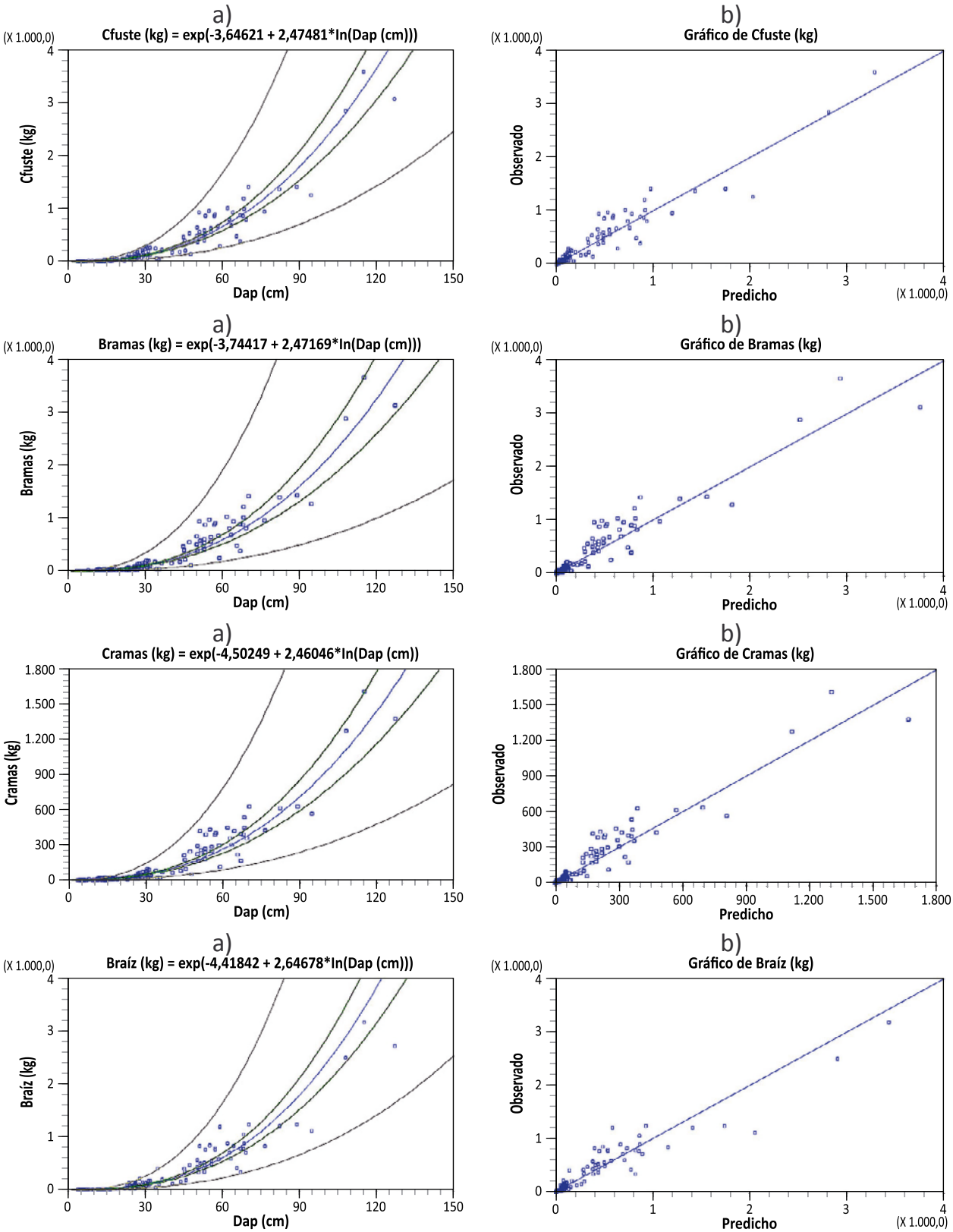


Figura 7. Continuación.

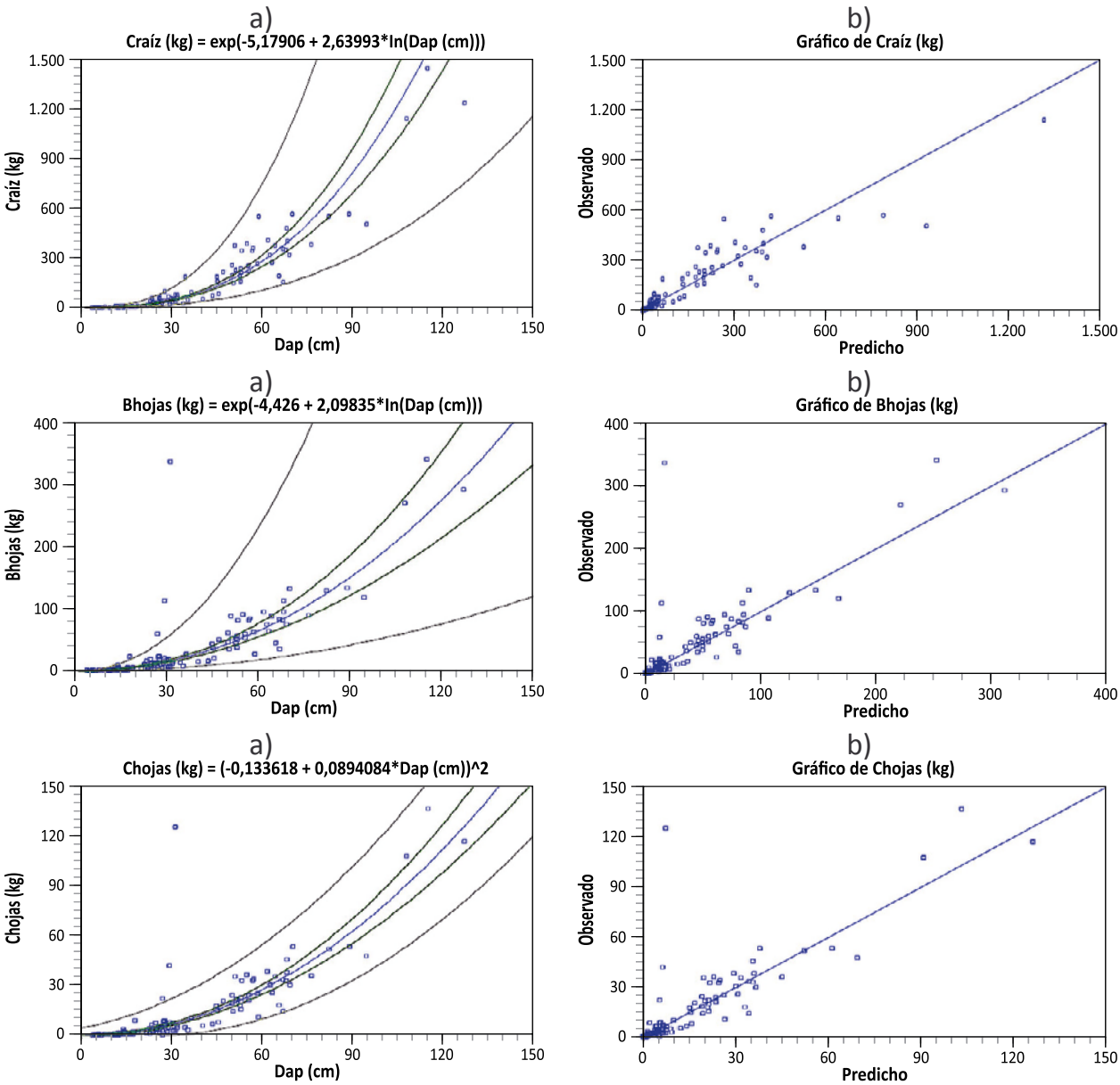


Figura 7. Continuación.

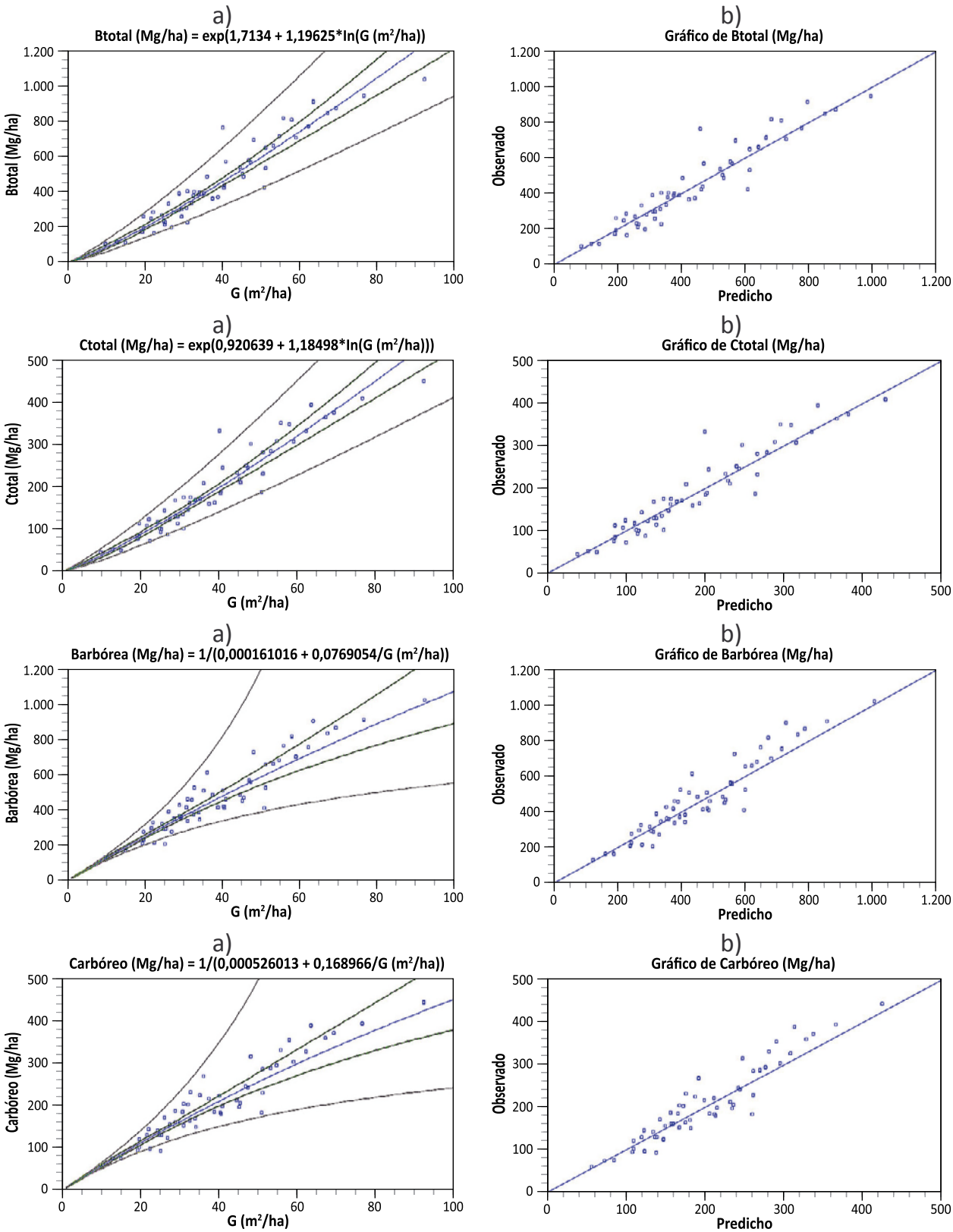


Figura 8. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosques de zonas altas de Costa Rica: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos *vs* observados.

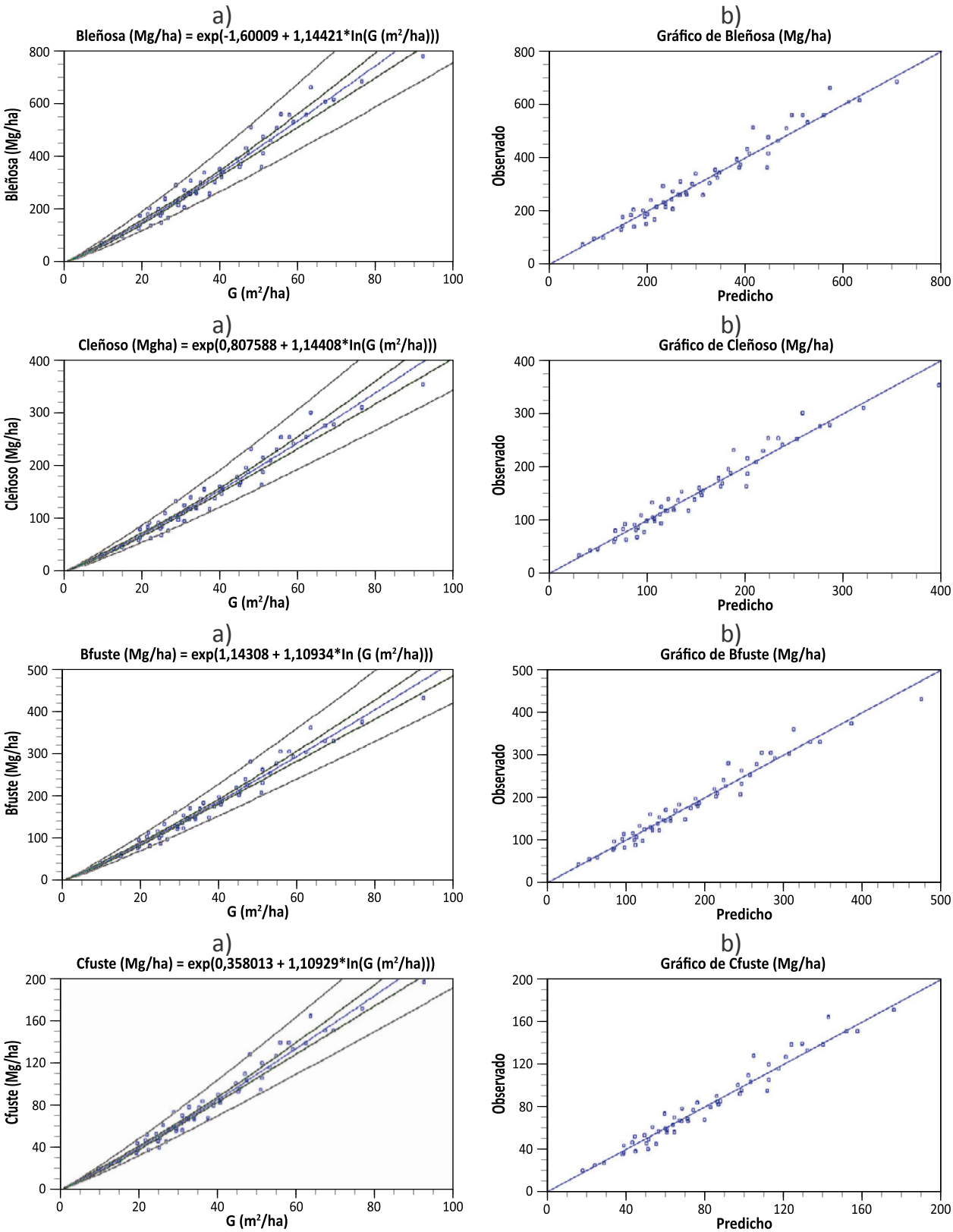


Figura 8. Continuación.

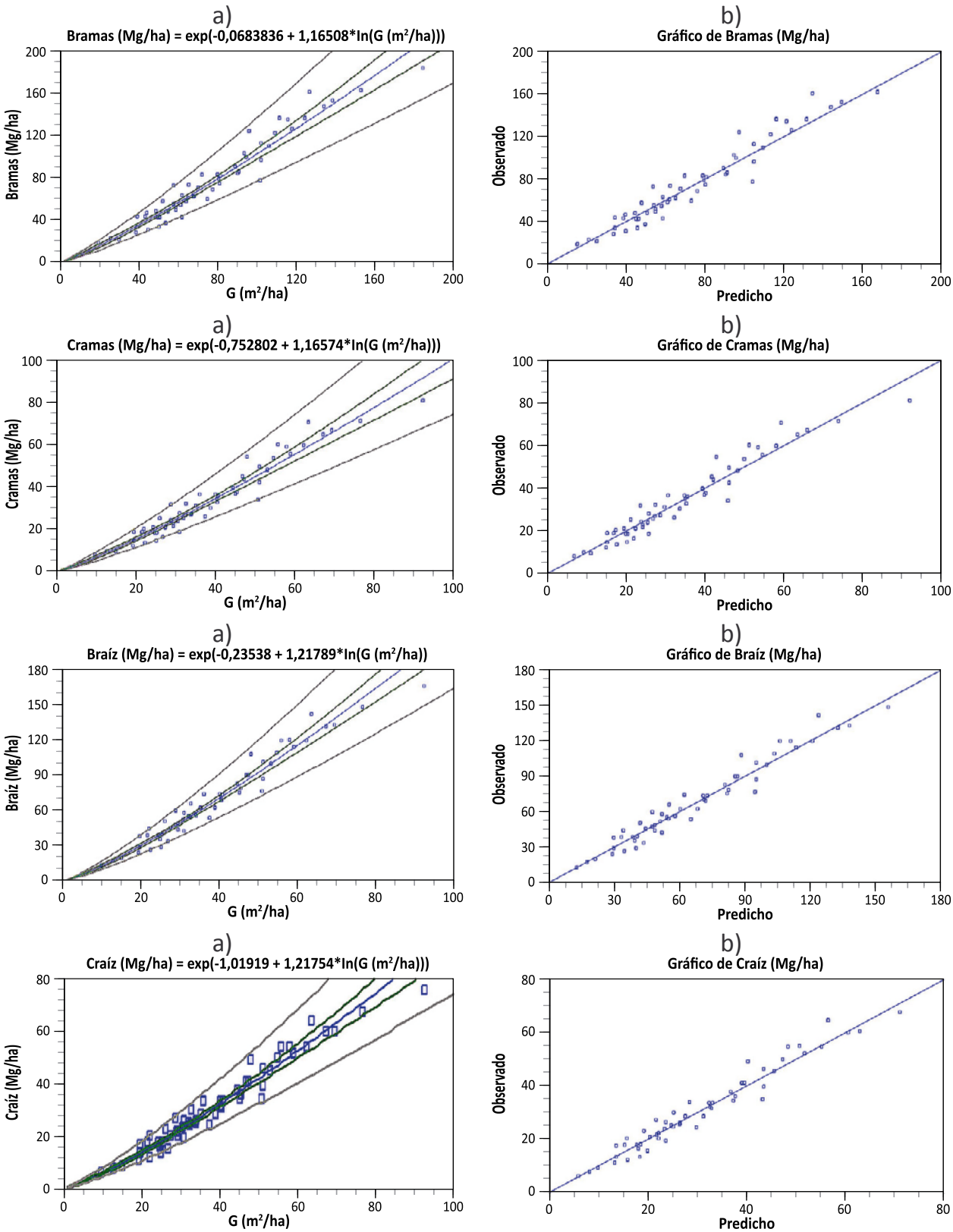


Figura 8. Continuación.

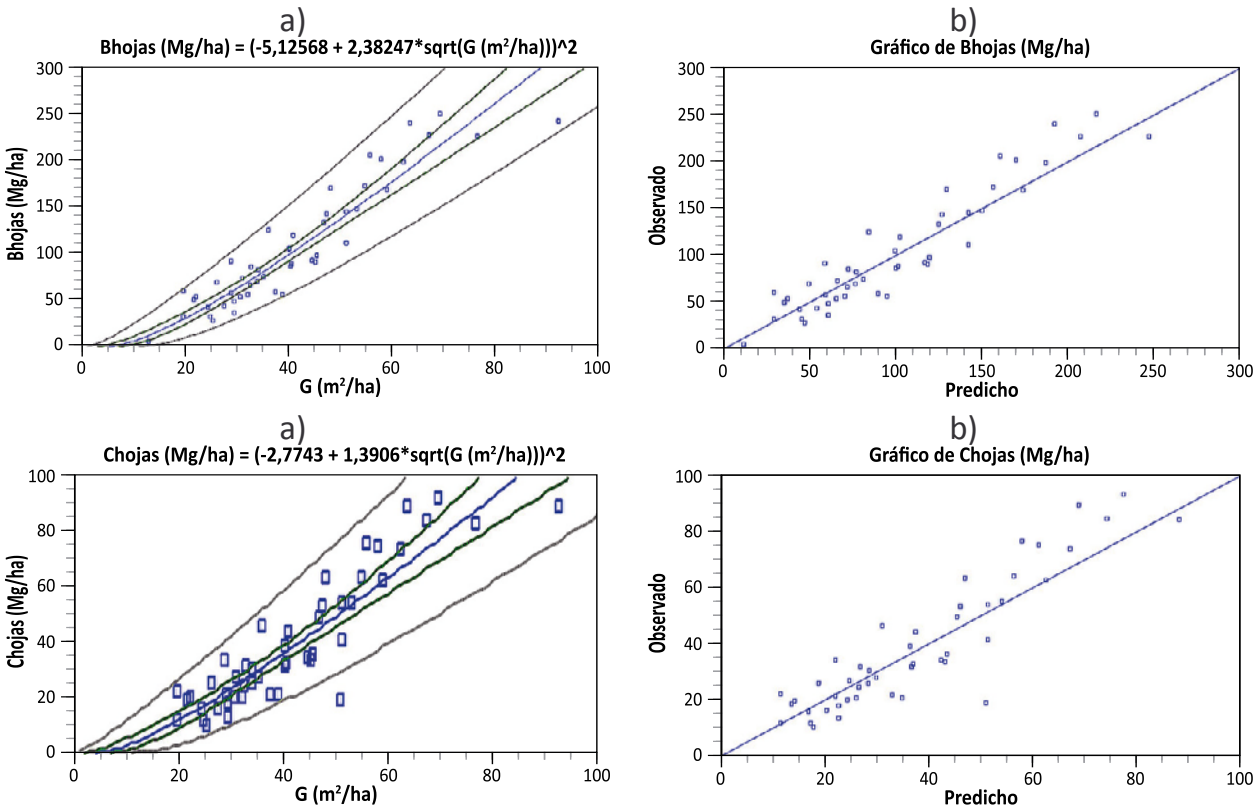


Figura 8. Continuación.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Biomasa y carbono en la vegetación y necromasa

Los ecosistemas boscosos de la Zona Pacífico Central y Zonas Altas poseen un área basal similar (poco más de 38 m^2 ha^{-1}), superior a los de la Zona Norte (21,3 m^2); lo que explica la diferencia en la biomasa o el carbono acumulado (Lozano et al., 2018; Fonseca et al., 2019). Es de esperar que la inferioridad en G para los bosques de la Zona Norte, se deba al mayor grado de intervención producto de aprovechamientos forestales. En esta zona los bosques han sido objeto de planes de manejo forestal, casi todos con segunda cosecha, extrayendo los árboles de mayor tamaño, ocasionando alteraciones en la estructura de la masa y reduciendo significativamente el área basal.

A pesar de que las regiones del Pacífico Central y Zonas Altas tienen un G muy similar, también presentan diferencias muy marcadas en la biomasa acumulada. En este caso, una posible explicación es que en Zonas Altas los bosques tienen una composición muy alta de árboles del género *Quercus*, que son de gran tamaño en diámetro y altura. Otros factores que pueden explicar la variabilidad en G, y por ende en la acumulación de biomasa y carbono, pueden ser la edad del ecosistema y la calidad de sitio, y el tipo de disturbios (incendios, manejo, degradación del bosque) (Álvarez et al., 2012; Miles et al., 2006). Es importante recordar, que la biomasa se caracteriza por su alta heterogeneidad (Segura y Kanninen, 2002).

El mayor grado de intervención de los bosques en la Zona Norte, genera la apertura de claros que permiten la entrada de luz, lo cual induce al

ingreso de herbáceas al sotobosque, y además, la acumulación de necromasa producto de la cosecha. Estos dos aspectos suman para que la biomasa vegetal y la necromasa sean casi el triple con respecto al Pacífico Central. En las Zonas Altas la vegetación herbácea observada fue escasa, pero abunda la necromasa.

La necromasa y la vegetación herbácea aportan muy poco al carbono almacenado en los ecosistemas evaluados, variando de 2% en el Pacífico Central a 7,5% en la Zona Norte, cifra a considerar para valorar si en futuros estudios es conveniente evaluar estos componentes, dado la inversión en tiempo que conlleva. Este comportamiento ocurre para otros sitios, por ejemplo, Torres et al., (2012) mencionan que las especies leñosas representan casi el 100%. En bosque secundario de 15 años Chacón et al., (2007) mencionan que el C fijado en los árboles representó el 90,6%, en el mantillo (hojarasca) fue de 0,08% (0,04 ± 0,01 Mg ha^{-1}) y en las herbáceas (0,6 ± 0,1) Mg ha^{-1}. Por su parte Yepes et al., (2016) mencionan que los robledales almacenan 272,9 ± 42,0 MgC ha^{-1}, 72,5 % en la biomasa aérea, 13,6 % en la raíz y 13,9 % en la necromasa.

Valores similares a los obtenidos en este estudio se revelan para otras latitudes (Norte, Centro y Sur América), en ecosistemas húmedos, con variaciones en cifras de biomasa o carbono que pueden deberse a condiciones ambientales, a actividades antrópicas y a diferencias metodológicas (componentes de biomasa medidos, diámetro mínimo considerado, especies evaluadas y método usado para determinar la biomasa y el carbono).

La biomasa arbórea y el depósito de carbono calculado en el presente estudio (162,3 Mg biomasa*ha^{-1}, 73,7 Mg C*ha^{-1} en la Zona Norte; 306,8 Mg biomasa*ha^{-1}, 198,9 Mg C*ha^{-1} en la Zona Pacífico Central; 476,4 Mg biomasa*ha^{-1}, 208,2 Mg C*ha^{-1} en las Zonas Altas), es congruente con lo reportado para Costa Rica por Segura et al., (2000) en bosques naturales de la región Caribe, quienes determinaron una biomasa de122 Mg ha^{-1} (55 Mg C*ha^{-1}), así como Ulate (2011) que brinda cifras de biomasa (Mg ha^{-1}) para bosques primarios de 164,32 y 207 en Bosque Húmedo Tropical Basal, 247,5 en Bosque Húmedo Premontano, 219,6 en Bosque Muy Húmedo Premontano, 233,3 en Bosque Pluvial Premontano, 211 en Bosque húmedo Montano Bajo, 445,4 en Bosque Muy Húmedo Montano Bajo, y 243,1 en Bosque Pluvial Montano Bajo.

En otras latitudes, Cuenca et al., (2014) reportan en tierras bajas de la Amazonía Ecuatoriana una biomasa aérea de 124,85 Mg ha^{-1} (62,4 Mg C), mientras Arreaga (2002) determinó 162,27 Mg ha^{-1} para ecosistemas tropicales en la Reserva de Biósfera Maya de Guatemala, Araujo et al., (2006) reportaron 268 Mg ha^{-1} para bosques siempreverdes de Bolivia y Unger et al., (2012) 344 ± 17 Mg de biomasa*ha^{-1} (172 ± 8,5 Mg C). Por otro lado, Honorio et al., (2015), calcularon un promedio de 193,9 ± 55,6 Mg de biomasa*ha^{-1} en bosques aluviales de la amazonia peruana, Araujo et al., (2006) estimaron 326 Mg biomasa*ha^{-1} (156 Mg C ha^{-1}) para bosque húmedo siempre verde, y Lozano et al., (2018) 322,37 Mg ha^{-1} (161,07 Mg C). Sánchez et al., (2017) reportó una biomasa desde 153,3 Mg (76,6 Mg C) a 252,0 Mg ha^{-1} (126 Mg ha^{-1}) para Bosque Húmedo Montano Bajo y Yepes et al., (2015) indicó 181,04 y 195,04 Mg ha^{-1} en Bosque Húmedo Montano Bajo.

Los resultados de biomasa y carbono determinados en el presente estudio y los citados por los autores antes mencionados, y otros más, se encuentran dentro del rango (45-649 Mg ha^{-1}, con 275,2 Mg ha^{-1}promedio), expresado por Clark et al., (2001) para bosques tropicales de distintas zonas del mundo.

En relación a la fracción de carbono (FC) por componente obtenida en este estudio, la necromasa fina y la vegetación herbácea

presentan los valores más bajos, oscilando desde 34,5% a 37,7% y entre 43,9% a 45,6% para los componentes leñosos. Estos valores están dentro del rango reportado por Fonseca et al., (2019), para ecosistemas deciduos, y son inferiores al 0,45-0,5 recomendado por Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC] (2006) y Gaillard et al., (2002); utilizado en variedad de trabajos. Valores similares a los encontrados en esta investigación y que demuestran que la fracción o contenido de carbono en la biomasa varía con la especie y con el tejido o componente, también fueron reportados por Soares y Oliveira (2002), Gayoso y Guerra (2005), Castaño y Bravo (2012), Fonseca et al., (2011, 2012) y Herrero de Aza (2011).

4.2. Factores de expansión de la biomasa (FEB) y distribución de la biomasa y el carbono por componente estructural del árbol

La determinación de FEB, es un procedimiento muy usado para facilitar la estimación de la biomasa de la copa (hojas y ramas) (Dixon,1995; IPCC, 1996), y raras veces se incluye la biomasa radical o se calculan por separado para cada componente estructural del árbol.

En este estudio el FEB para incluir la biomasa de la copa varió de 1,4 en la Zona Norte a 1,6 en la Zona Alta, cifra inferior al 1,6 recomendado por Dixon (1995) e IPCC (2006) y al obtenido para otras especies en bosque natural o plantadas. Segura et al., (2000) reportan un valor de 1,6 promedio para varias especies en bosque natural, Fonseca (2009) indica 1,44 como promedio para varias especies en bosque secundario; 1,75 fue determinado para *Nothofagus pumilio* según Loguercio y Defoseé (2001), y 1,37 para *Pinus pseudostrobus* (Domínguez et al., 2009).

El factor de expansión para la raíz varió de 1,34 en Zona Norte a 1,47 en el Pacífico Central, lo que es superior a lo reportado por Cairns (1997) (1,25 para especies deciduas independientemente de la latitud o la textura edáfica en la que se desarrollen los árboles) y Fonseca et al., (2009) (1,25 para 35 especies en bosques secundarios y 1,30 para *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en plantación). Es inferior al calculado por Gaston et al., (1998), para bosques y sabanas en ambientes áridos y semi-áridos (1,47) y para varias especies deciduas de la Península Ibérica (Ruíz et al., 2011).

La distribución de la biomasa y el carbono en los distintos componentes estructurales del árbol, calculados en este estudio, 53,7% de la biomasa y 55,0% del carbono en el fuste; las ramas con el 17,6% de la biomasa y el 22,5% de carbono; 18% de biomasa y 24,1% de carbono en las raíces y menos del 5% de biomasa y carbono en el follaje, tienen un comportamiento muy similar a lo reportado para diferentes ecosistemas naturales y plantados. Fonseca et al., (2019) reportaron que la raíz aportó el 29,9% a la biomasa del árbol en bosques caducifolios, mientras Torres et al., (2012) indican un 22,5% en bosque seco tropical del Valle del Cauca, Colombia. Bueno et al., (2019) para *Pinus occidentalis,* indicaron que el fuste aportó el 74,5% a la biomasa aérea, las ramas el 13,3% y 12,1% el follaje.

Cortés et al., (2019) para varias especies del género *Quercus*, calcularon que la biomasa del fuste aportó el 60,6% a la biomasa aérea, mientras las ramas y follaje el 36,1% y 3,28%, respectivamente. Vargas et al., (2017) también para especies de *Quercus*, encontraron que la biomasa promedio fue de 73,8%, 22,2% y 4,0% para fuste, ramas y follaje, respectivamente.

Es importante resaltar, el esfuerzo realizado en esta investigación en aportar información sobre biomasa o carbono en la raíz, componente que ha sido poco estudiado por el grado de dificultad que conlleva la evaluación (Dixon, 1995 y Fonseca, 2017).

4.3. Modelos para estimar biomasa y carbono

Los modelos alométricos en las últimas décadas, sobresalen como la técnica más práctica y económica para estimar la biomasa y el carbono, y con ello, evaluar la contribución de un ecosistema a la mitigación del cambio climático. El método destructivo, combinado con el desarrollo de ecuaciones alométricas locales, es el más preciso para determinar la biomasa aérea (Araujo et al., 1999; Chambers et al., 2001; Del Valle, et al., 2003; Návar et al., 2004; IPCC, 2006; Návar et al., 2013; Chave et al., (2014); Puc et al., 2020). Por su parte Álvarez (2008), considera que el uso de modelos desarrollados para otras regiones, tiene limitaciones ya que las condiciones ambientales (clima, suelo) y la genética influyen sobre el crecimiento y en la fijación del carbono.

En las tres zonas estudiadas, en los diferentes componentes estructurales del árbol y en el árbol completo, para la biomasa y el carbono, se logró seleccionar modelos con buen ajuste $R^2 \geq 78,7\%$, con sesgos de estimación muy bajos ($E<22,7\%$); ajustes similares a los obtenidos (R^2 entre 84 y 99%) por Cuenca et al., (2014) para biomasa aérea total utilizando como variables explicativas el diámetro y la altura, Lozano et al., (2018) con un R^2 entre 80 y 98% para biomasa aérea usando el diámetro y la altura como variables descriptoras.

En este estudio, el menor ajuste y el mayor sesgo se presentó para los componentes hojas, ramas y raíz, que por lo general han mostrado poca correlación con la variable o variables explicativas, demostrando la existencia de una relación alométrica poco definida, entre la biomasa de estos componentes con el diámetro y la altura (Montero y Kanninen, 2002; Pérez y Kanninen, 2003; Fonseca et al., 2009; Návar et al., 2011 y Risio, 2012). El valor del R^2 demuestra correlación alta y positiva entre la biomasa o el carbono y el diámetro, situación similar reportada en gran variedad de estudios en ecosistemas naturales o plantados (Solano et al., 2014 y Bustos et al., 2015).

En los modelos agregados, el área basal es una variable que explicó muy bien la biomasa y el carbono esperado por hectárea, con un ajuste muy bueno ($R^2 \geq 80,6\%$) y con mucha precisión, demostrado con errores de estimación (E%) inferiores al 7%.

Los modelos elegidos, para el de árbol y sus componentes estructurales, así como los agregados, por el buen ajuste y la precisión demostrada, son de mucha confiabilidad, adicionalmente, son muy sencillos y prácticos para utilizar porque solo requieren de una variable explicativa, el diámetro o el área basal, que es muy fácil de medir o calcular y se obtiene en casi todos los inventarios. En los modelos por árbol, el uso de regresión múltiple, con variables con la altura y la densidad específica de la madera, mejoran el ajuste y la capacidad predictiva de los modelos (Cuenca et al., 2014, Cortés et al., 2019; Puc et al., 2020), sin embargo, la dificultad e imprecisión que conlleva la medición de la altura puede ocasionar errores más altos al aplicar el modelo y aumentar el costo del inventario. El uso de la densidad de la madera como variable explicativa, también tiene sus desventajas, por ejemplo, no en todas las especies se reporta su valor, la densidad varía con la edad, con la altura del árbol y la zona climática (Chave et al., 2009).

Los modelos agregados facilitan el cálculo de la biomasa o el carbono por hectárea, porque evita hacer estimaciones individuales para árboles o para agrupaciones (clases diamétricas) y hacer luego las extrapolaciones a hectárea, pasos en los cuales se cometen errores si no se tiene cuidado y experiencia (Fonseca et al., 2019). Estos modelos son poco frecuentes en la literatura, pero presentan muy buenos ajustes como los logrados por Martínez et al., (1992) y Fonseca et al., (2011-2012), similares a los obtenidos en este trabajo ($R^2 \geq 80,6$).

5. CONCLUSIONES

El grupo de ecuaciones elegidas para estimar la biomasa y el carbono son buenas predictoras para árboles individuales y a nivel de ecosistema, siempre que sean usadas dentro de los límites de cada zona, de los rangos diamétricos o de área basal, y se convierten en un instrumento que contribuye en la reducción de los costos del inventario.

Estas ecuaciones pueden ser utilizadas para reducir la incertidumbre en bosques naturales a nivel nacional, al no tener que recurrir a modelos desarrollados en otras latitudes, de esta forma su aplicación es de gran utilidad en el proceso de consolidación del programa de carbono, en la implementación de la estrategia REDD+ y se espera que facilite el proceso de cálculo para el reporte de absorciones en los inventarios de carbono a nivel país.

6. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por el aporte financiero de la Universidad Nacional de Costa Rica y de la Agencia para la Cooperación Alemana (GIZ), por la cooperación del Sistema Nacional de Áreas de Conservación de Costa Rica (SINAC) y por el apoyo de los propietarios de los terrenos, quienes permitieron la realización del estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, E. y Marín, M. A. (2011). *Manual de procedimientos analíticos para suelos y plantas.* México. Universidad Autónoma de Chapingo. 65 p.

Álvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia*. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 80 p.

Álvarez, E., Mendoza, I., Pacheco, M., Restrepo, Z., Benítez, D., Gutiérrez, T.D., Ramírez, O. C., Dib, C., Roldan, A., Carbono, E., Zarza, E., Velásquez, L. A., Serna, M., Velásquez, C., Álvarez, Y., Jiménez, O., Martínez, M., Idarraga, A. y Gómez, F. (2012). ¿Por qué implementar estudios de largo plazo en el Bosque Seco del Caribe colombiano? *Revista Intrópica.* 7:97-113.

Aquino, M., Velázquez, A., Castellanos, J. F., los Santos, D. y Etchevers, J. D. (2015). Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia*. 49(3):299-314. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/317440442

Araujo, A., Arroyo, L., Killeen, T. J. y Saldias, M. (2006). Dinámica del bosque, incorporación y almacenamiento de biomasa y carbono en el Parque Nacional Noel Kempff Mercado. *Ecología en Bolivia.* 41(1):24-45. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/279853396

Araujo, T.M., Higuchiand, N. & Carvalho, J.A. (1999). Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Para, Brazil. *Forest Ecology and Management*. 117(1-3): 43-52. Recovered from: http:// doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00470-8.

Arreaga, W. (2002). *Almacenamiento del carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de Biósfera Maya, Petén, Guatemala*. Tesis de maestría. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 73 p.

Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G., Lewis, S., Phillips, O., Asner, G., Armston, J., Ashton, P., Banin, L., Bayol, N., Berry, N., Boeckx, P., de Jong, B., Devries, B., Girardin, C., Kearsley, E., Lindsell, J., Lopez, G., Lucas, R., Malhi, Y., Morel, A., Mitchard, E., Nagy, L., Qie, L., Quinones, M., Ryan, C., Ferry, S., Sunderland, T., Vaglio, G., Cazzolla, R., Valentini, R., Verbeeck, H., Wijaya, A. & Willcock, S. (2016). An Integrated Pan-Tropical Biomass Map Using Multiple Reference Datasets. *Global Change Biology.* 22(4):1406-20.

Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P. S. A., Dubayah, R., Friedl, M. A., Samanta, S. & Houghton, R. A. (2012). Estimated Carbon Dioxide Emissions from Tropical Deforestation Improved by Carbon-Density Maps. *Nature Climate Change.* 2(3):182-85.

Bolaños, R., Watson, V. y Tosi, J. (2005). *Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge*. Escala 1:750 000. Centro Científico Tropical. San José, Costa Rica.

Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer*. Forestry Paper 134. Rome, Italy: FAO.

Brown, S., Gillespie, A. & Lugo, A. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science.* 35(4):881-902. Recovered from: https://www.researchgate.net/publication/233643575_Biomass_Estimation_Methods_forTropical_Forests_with_Applications_to_Forest_Inventory_Data

Bueno, S. W., García, E. & Caraballo, L. R. (2019). Allometric equations for total aboveground dry biomass and carbon content of *Pinus occidentalis* trees*. Madera Bosques*. 25(3):1-16. Recovered from: http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v25n3/2448-7597-mb-25-03-e2531868.pdf

Bustos, D., Morales, A., Cambrón, V.H. y Ledesma, M. (2015). Estimación de la capacidad de captura de carbono de la vegetación del parque nacional El Cimatario, Querétaro. *Digital Ciencia@uaqro.*1:1-11. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/323430612QR

Cairns, M., Brown, S., Helmer, E. H. & Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecología.* 111(1): 1-11. Recovered from: http:// doi.org/10.1007/s004420050201

Castaño, J. & Bravo, F. (2012). Variation in carbon concentration and basic density along stems of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in the Cantabrian Range (NW Spain). *Annals of Forest Science.* 69(6):633-672. Recovered from: http:// doi.org/10.1007/s13595-012-0183-6

Chacón, P., Leblanc, H. y Russo, R (2007). Fijación de carbono en un bosque secundario de la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical*. 3(1):1-11. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/237351741_Fijacion_de_carbono_en_un_bosque_secundario_de_la_region_tropical_humeda_de_Costa_Rica

Chambers, J.Q., Dos Santos, J., Ribeiro, R.J. & Higuchi, N. (2001). Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest*. Forest Ecology and Management* 152: 73-84.

Chave J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson, B., W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecología.* 145:87-99. Recovered from: https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x

Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., Lao, S. & Pérez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. Philosophical Transactions: *Biological Ciences.* 359(1443):409-420. Recovered from: http:// doi.org/10.1098/rstb.2003.1425

Chave, J., Réjou, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P., Goodman, R., Henry, M., Martínez, A., Mugasha, W., Muller, H., Mencuccini, M., Nelson, B., Ngomanda, A., Nogueira, E., Ortiz, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan, C., Saldarriaga, J. G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models

to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology.* 20(10):3177–3190. Recovered from: https://doi.org/10.1111/gcb.12629

Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G. & Amy, E. (2009). Towards a Worldwide Wood Economics Spectrum. *Ecology Letters*. 12: 351–366. Recovered from: https://doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x.

Cifuentes, M., Henry, M., Méchain, M., López, O., Wayson, C., Michel, J. M., Castellanos, E., Zapata, M., Piotto, D., Alice, F., Castañeda, H., Cuenca, R., Cueva, K., Del Águila, J., Duque, A., Fernández, J., Jiménez, A., Gunnar, L., Milla, F., Návar, J., Ortiz, E., Pérez, J., Ramírez, C., Rangel, L., Rubilar, R., Saint-André, L., Sanquetta, C., Scott, Ch. & Westfal, J. (2015). Overcoming obstacles to sharing data on tree allometric equations. *Annals of Forest Science*. Recovered from: https://doi.org/10.1007/s13595-015-0467-8.

Clark, D.A., Brown, S., Kicklighter, D., Chambers, J., Thomlinson, J., Holland, E. & Ni, J. (2001). Net primary production in forest: an evaluation and sinthesis of existing field data. *Ecological Aplications* 11(2): 356- 370. Recovered from: https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0371:NPPITF]2.0.CO;2.

Cortés, B. G., Ángeles, G., Santos, H. M. y Ramírez, H. (2019). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y Bosques*. 25(2):1-17. Recuperado de: http://doi:10.21829/myb.2019.2521799.

Cuenca, M. E., Jadán, O., Cueva, K. y Aguirre, C. (2014). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *Cedamaz*. 4(1): 21-31. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/269095325_Carbono_y_ecuaciones_alometricas_para_grupos_de_especies_y_bosque_de_tierras_bajas_Amazonia_Ecuatoriana.

Dauber, E., Terán, J. y Guzmán, R. (2008). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana.* 1(1):1-10. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/268047339_Teran_Estimaciones_de_Biomasa_y_Carbono_en_bosques_naturales_de_Bolivia_Estimaciones_de_biomasa_y_carbono_en_bosques_naturales_de_Bolivia

Del Valle, J.I., Moreno, F. y Orrego. S. (2003). Los bosques tropicales y su contribución a la mitigación del cambio climático. pp. 3-43. En: Orrego, S.A., Del Valle, J.I. y Moreno, F.H. (eds.). *Medición de la captura de C en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Contribuciones para la mitigación del cambio climático*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 314 p. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/44479563_Medicion_de_la_captura_de_carbono_en_ecosistemas_forestales_tropicales_de_Colombia_contribuciones_para_la_mitigacion_del_cambio_climatico_editores_Sergio_Alonso_Orrego_S_Jorge_Ignacio_del_Valle_A_Flav

Dixon, R. (1995). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry systems.* 31:99-116. Recovered from: https://doi.org/10.1007/BF00711719

Domínguez, G., Aguirre, O., Jiménez, J., Rodríguez, R. y Díaz, J. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* 15(1):59-64. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/51022823

Drake, T. W., Raymond, P. A. & Spencer, R. G. (2018). Terrestrial Carbon Inputs to Inland Waters: A Current Synthesis of Estimates and Uncertainty. *Limnology and Oceanography Letters.* 3(3):132–42.

Dutcă, I., Mather, R. & Loraș, F. (2020). Sampling Trees to Develop Allometric Biomass

Models: How Does Tree Selection Affect Model Prediction Accuracy and Precision? *Ecological Indicators.* 117(May):106553

Fonseca, W. (2009). *Restauración forestal y almacenamiento de carbono en el trópico húmedo (Zona Caribe de Costa Rica)*. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá, España. 190 p.

Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales.* 51(2):91-109.

Fonseca, W., Alice, F. y Rey-Benayas, J.M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*. 30 (1):36-47. Recuperado de: https:// doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006.

Fonseca, W., Alice, F. y Rey-Benayas, J. M. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management.* 262:1400-1408. Recovered from: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.06.036

Fonseca, W., Alice, F., y Rey-Benayas, J. M. (2012). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests.* 43(2):197-211. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/s11056-011-9273-9

Fonseca, W., Villalobos, R. y Rojas, M. (2019). Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono. *Ciencias Ambientales*. 53(2):111-131. Recuperado de: https://doi.org/10.15359/rca.53-2.5

Forrester, D. I., Tachauer, H.H., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz, R., Stark, H., Vacchiano, G., Zlatanov, T. & Chakraborty, T. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *For Ecol Manage*. 396:160.75. Recovered from: https://doi: 10.1016/j.foreco.2017.04.011

Gaillard, C., Pece, M. y Juárez, M. (2002). Biomasa aérea de quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) en dos localidades del Parque Chaqueño Seco. *Revista Ciencias Ambientales – Quebracho*. 9:116-127. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/481/48100911.pdf

Gaston, G., Brown, S., Lorenzini, M. & Singhi. K. (1998). State and change in carbon pools in the forests of tropical Africa. *Global Change Biology.* 4:97-114. Recovered from: https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00114.x

Gayoso, J. y Guerra. J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque*. 26(2):33-38. Recuperado de: https://doi.org /10.4067/S0717-92002005000200005

Herrero de Aza, C., Turrión, M., Pando, V. & Bravo, F. (2011). Carbon in heartwood, sapwood and bark along the stem profile in three Mediterranean *Pinus* species. *Annals of Forest Science.* 68(6):1067-1076. Recovered from: https://doi.org/10.1007/s13595-011-0122-y

Honorio, E. N., Vega, J. E. y Corrales, M. N. (2015). Diversidad, estructura y carbono de los bosques aluviales del noreste peruano. *Folia Amazónica.* 24(1):55-70. Recuperado de: https://doi.org/ 10.24841/fa.v24i1.59

Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). (1996). *Report of the twelfth session of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories*. México: IPCC.

Intergovernmental Panel of Climate Change. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.* Volumen 4, Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.

Recuperado de: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf

Instituto Meteorológico Nacional. (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. Informe Técnico. Segunda Comunicación. San José. Costa Rica. 75 p.

Krebs, J.C. (1985). Ecología: *Estudio de distribución y abundancia*. México. Segunda edición. ED. Harla. México. 753 p.

Le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., van der Werf, G. R., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell, J. G., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A. K., Jourdain, C., Kato, E., Keeling, R. F., Klein, K., Levis, S., Levy, P., Lomas, M., Poulter, B., Raupach, M. R., Schwinger, J., Sitch, S., Stocker, B. D., Viovy, N., Zaehle, S & Zeng, N. (2012). *The global carbon budget 1959-2011. Earth System Science Data Discussions.* 5:1107-1157. Recovered from: https://doi.org/10.5194/essdd-5-1107-2012

Loguercio, G. y Defossé, G. (2001). *Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la lenga Nothofagus pumilio (Poepp. Et Endl) Krasser, en el So del Chubut, Argentina*. Ponencia presentada en el Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile. Recuperado de: https://www.uach.cl/externos/procarbono/pdf/simposio_carbono/44_Loguercio.PDF

Lozano, D. C., Palacios, B. G. y Aguirre, Z. A. (2018). Modelos alométricos para estimar el almacenamiento de carbono de bosques montanos bajos en el sur del Ecuador. *Ciencia Forestal*. 28 (3):1328-1339. Recuperado de: http://dx.doi.org/10.5902/1980509833464

Madelon, L., Poorter, L., Martínez, M., & Bongers, F. (2015). Biomass Is the Main Driver of Changes in Ecosystem Process Rates during Tropical Forest Succession. *Ecology.* 96(5):1242–52.

Martínez, A., Sarukhan, J., Pérez, J., Rincón, E., Maass, J. M., Solís, A. & Cervantes, L. (1992). Above-ground phytomass of a tropical deciduous forest on the coast of Jalisco, México. *Journal of Tropical Ecology.* 8:87-96. Recovered from: http://www.jstor.org/stable/2559815

Miles, L., Newton, A. C., De Fries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V. & Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeograph.* 33(3):491-505. Recovered from: https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x

Mohren, G. M. J., Hasenauer, H., Köhl, M. & Nabuurs, G. J. (2012). Forest Inventories for Carbon Change Assessments. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 4(6):686–95.

Montero, M. y Kanninen, M. (2002). Biomasa y Carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona sur de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*. 39-40. Recovered from: https://www.academia.edu/4017345/Biomasa_y_Carbono_en_plantaciones_de_Terminalia_amazonia_en_la_zona_Sur_de_Costa_Rica

Návar, J. (2009). Alometric equations and expansion factors for tropical dry trees of eastern Sinaloa, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems.* 10:45-52. Recuperado de: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.894.884&rep=rep1&type=pdf

Návar, J., González, N. y Graciano, J. (2011*). Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México*. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/497/49746888003.pdf

Návar, J., Méndez, E., Graciano, J., Dale, V. & Parresol, B. (2004). Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments.* 59:657-674. Recovered from de: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.02.010

Návar, J., Rodríguez, F. y Domínguez, P.A. (2013). Ecuaciones alométricas para árboles tropicales: aplicación al inventario forestal de Sinaloa, México. *Agronomía Mesoamericana*. 24(2):347-356. Recuperado de: http://www.mag.go.cr/rev_meso/v24n02_347.pdf

Pérez, D. & Kanninen, M. (2003). Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*. 15 (1):199-213. Recovered from: https://www.researchgate.net/publication/287641313_Aboveground_biomass_of_Tectona_grandis_plantations_in_Costa_Rica

Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S., Joosten, H., Holmgren, P., Lehtonenm, A., Menton, M., Pullin, A. & Wattenbach, M. (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence.* 1(6):1-21. Recovered from: http://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6

Picard, N., Saint-André, L. y Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement [CIRAD]. Recuperado de: http://www.fao.org/3/i3058s/i3058s.pdf

Puc, R., Ángeles, G., Valdez, J.R., Reyes, V. J., Dupuy, J. M., Schneider, L., Pérez, P. & García, X. (2019). Species-specific biomass equations for small-size tree species in secondary tropical forests. *Trop Subtrop Agroecosystems*. 22(3):735-754. Recovered from: https://www.researchgate.net/publication/337682547

Ramos, J. A., García, J. J., Hernández, J., García, X., Velarde, J. C., Muñoz, H. y Guadalupe, G. (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5(23):93-109. Recuperado de: http://doi.org/10.29298/rmcf.v5i23.344

Risio, L. (2012). *Cuantificación de Biomasa y carbono en bosques nativos de Prosopis caldenia (Burkart) en la Pampa semiárida, Argentina*. Valladolid, España. Universidad de Valladolid, Campus de Palencia, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias.71 p.

Ruiz, R., Rio, M. & Montero, G. (2011). New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood. Species. *Forest systems.* 20(1):176-188. Recovered from: http://doi.org/ 10.5424/fs/2011201-11643

Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M. & Morel, A. (2011). Benchmark Map of Forest Carbon Stocks in Tropical Regions across Three Continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 108(24):9899–9904.

Salas, C. (2002). Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque.* 23(2):81-92. Recuperado de: http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002002000200009

Sánchez, O. J. y Ramírez, L. A. (2017). *Potencial de captura de carbono en bosque tropical y alto andino en 4 municipios de la jurisdicción de Corpochivor*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Bogotá. 53 p. Documento para optar por el título de Ingeniero Forestal en

Modalidad Investigación-Innovación. Recuperado de: http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5928/1/SanchezAlvarezOscarJulian2017.pdf

Schimel, J. P., Chambers, J. Q., Melack, J. M., Ferreira, L. V. & Higuchi, N. (2002). Decomposition and Carbon Cycling of Dead Trees in Tropical Forests of the Central Amazon. *Oecologia.* 122(3):380–88.

Segura, M. y Kanninen, M. (2002*). Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales. In Inventarios forestales para bosques latifoliados en América central*. Orozco L, C Brumer eds. Turrilaba, Costa Rica. CATIE. p 173-212.

Segura, M. y Andrade, H. (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas.* 46:89-96. Recuperado de: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6935/Como_construir_modelos_alometricos.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Segura, M., Kanninen, M., Alfaro, A. y Campos, J. J. (2000). Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana.* 30:23-28. Recuperado de: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5762/almacenamiento_y_fijacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Soares, C. y Oliveira, M. L. (2002). Equaçoes para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em viçosa, Minas Gerais. *Árvore.* 26(5):533-539. Recuperado de: http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622002000500002

Solano, D., Eras, V. y Cueva, K. (2014). Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. *Revista Cedamaz.* 4(1):32-44. Recuperado de: https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/227

Torres, A. M., Adarve, J. B., Cárdenas, M., Vargas, J. A., Londoño, V., Rivera, K. Home, J., Duque, O. L. y González, A. M. (2012). Dinámica sucesional de un fragmento de bosque seco tropical del Valle del Cauca, Colombia. *Revista Biota Colombiana.* 13(2):66-85. Recuperado de: http://doi.org/10.21068/bc.v13i2.263

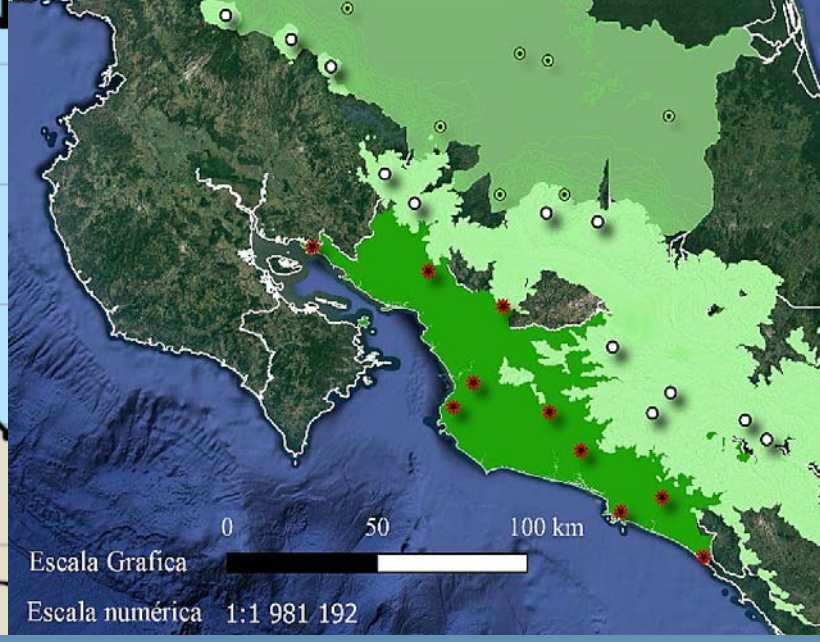
Ulate, C. A . (2011). *Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica*. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 61 p.

Unger, M., Homeier, J. & Leuschner, C. (2012). Efects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at diferent elevations in the equatorial Andes. *Journal Ecosytem Ecology*. 170:263-274. Recovered from: http://doi.org /10.1007/s00442-012-2295-y

Van Breugel, M., Ransijn, J., Craven, D., Bongers, F. & Hall. J. S. (2011). Estimating Carbon Stock in Secondary Forests: Decisions and Uncertainties Associated with Allometric Biomass Models. *Forest Ecology and Management*. 262(8):1648–57.

Yepes, A., Herrera, J., Phillips, J., Cabrera, E., Galindo, G., Granados, E., Duque, A., Barbosa, A., Olarte, C. y Cardona, M. (2015). Contribución de los bosques tropicales de montaña en el almacenamiento de carbono en Colombia. *Revista Biología Tropical*. 63(1):69-82. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/272885747

Yepes, A., Sierra, A., Niño, L. M., López, M., Garay, C., Vargas, D., Cabrera, E. y Barbosa, A. (2016). Biomasa y carbono total almacenado en robledales del sur de los Andes Colombianos: aportes para el enfoque REDD+ a escala de proyectos. *Revista Biología Tropical*. 64 (1):399-412. Recuperado de: http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v64i1.18221asgd



Instituto Meteorológico Nacional

Sitio web:
www.imn.ac.cr

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica

MINAE
Ministerio de Ambiente y Energía

imn
Instituto Meteorológico Nacional
Fundado en 1888