



Variabilidad y tendencias de la precipitación en San Andrés y Providencia, 1988–2022

Variabiliti ahn trends inna presipitieshan pan San Andres ahn Pravidens, 1988–2022

Precipitation variability and trends in San Andrés and Providencia, 1988–2022



Andrés Ochoa¹



Emmel Escovitch²

¹UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN. MEDELLÍN, COLOMBIA | AOCHOAJ@UNAL.EDU.CO

²UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE CARIBE. SAN ANDRÉS ISLA, COLOMBIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN. MEDELLÍN, COLOMBIA | EMESCOVITCHRI@UNAL.EDU.CO

Resumen

El agua dulce es un recurso esencial y escaso en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. La precipitación es la forma de acceso más directa y barata. La lluvia, además, alimenta las aguas subterráneas que son otra fuente de abastecimiento utilizada frecuentemente. El objetivo de este artículo es caracterizar, mediante estadística descriptiva, la variabilidad temporal de la precipitación diaria, mensual y anual en siete sitios de las islas de Providencia y San Andrés. La precipitación media anual en estas islas es del orden de 1800 mm y el régimen es de tipo mixto, con una temporada seca, una muy húmeda y dos moderadamente húmedas. Durante El Niño y La Niña se presentan alteraciones en la temporada moderadamente húmeda de mediados del año calendario y en octubre, que es el mes más lluvioso. En el largo plazo se observan tendencias significativas ($\alpha=0.05$) crecientes y decrecientes en la precipitación de algunos meses, pero no en la precipitación anual. El diagnóstico de variabilidad pluviométrica que se presenta es un insumo importante para la gestión del agua en aspectos como el suministro de agua potable a la población, el manejo de cultivos, la seguridad alimentaria, la planificación del turismo, el control de la erosión y la prevención y la mitigación de emergencias por exceso o déficit de lluvias.

Palabras claves:

agua, Caribe, clima, estacionalidad, hidrología.

Abstrak

Di swiit waata da wahn esenshal ahn skies risours iina di arkipelago a SanAndres, Old Providence ahn Ketlina. Presipitieshan da di chiipis ahn muos dairek wie fi get ih. Adishonali, di rien waata fiid di aanda ground waata, we da wahn ada sours piipl yuuz friikwentli fi soplai dehn self. Di objektiv a dis artikl da fi aidentifai ahn analiz chruu deskriptiv statistik di temporal variabiliti pan dieli, montli ahn yierli presipitieshan iina sevm plies pan Old Providence ahn San Andres. Di ailant dehn avrij yierli presipitieshan da roun 1800 mm, wid wahn miks sistem we gat: wahn jrai siizn, wahn rieni siizn, ahn tuu madariet rieni siizn. Iina El Niño ahn La Niña sohn alterieshan hapm iina di madariet wet siizn we tek plies iina di migl ah di yier, ahn iina Aktuoba, di wetis mont. Ouva taim, wi obsorv sohn signifikant tendensi ($\alpha=0.05$), iina di inkriis ahn dikriis a di presipitieshan iina sohn monts, bot no iina di yierli presipitieshan. Dis dayag-nuosis a pluviometrik variabiliti we dis work present, da wahn impuortant risours fi di difrent aspek a waata manijment, laik: di soplai a drinkin waata fi di komyuuniti ahn fi agrikoltoyo, fuud sekyoriti, turism planin, eruoshan kanchruol, ahn fih priwent ahn pripier fi imorjenci bikaaz a tu moch or tu likl rien.

Kiiwords:

Karibyan, haidrologi, siizonaliti, klaimit, waata.

Abstract

Fresh water is an essential and scarce resource in the archipelago of San Andrés, Providencia and Santa Catalina. Precipitation is the most direct and cheapest form of access. Rain also feeds groundwater, which is another frequently used source of supply. The objective of this article was to characterize, through descriptive statistics, the temporal variability of daily, monthly and annual precipitation in seven sites on the islands of Providencia and San Andrés. The average annual precipitation on these islands is around 1800 mm and the regime is mixed, with one dry season, one very humid season and two moderately humid seasons. During El Niño and La Niña, alterations occur in the moderately wet season in the middle of the calendar year and in October, which is the rainiest month. In the long term, significant increasing and decreasing trends ($\alpha=0.05$) are observed in the precipitation of some months, but not in the annual precipitation. The diagnosis of rainfall variability presented is an important input for water management in aspects such as the supply of drinking water to the population, crop management, food security, tourism planning, erosion control and prevention and mitigation of emergencies due to excess or deficit of rain.

Keywords:

Caribbean, climate, hydrology, seasonality, water.

Introducción

Las fuentes de abastecimiento de agua en las islas de San Andrés y Providencia son el agua lluvia, el uso de pozos (alimentados por agua lluvia) y la desalinización de agua de mar (Departamento Nacional de Planeación, 1992), y los costos en infraestructura incrementan en ese mismo orden. Por lo tanto, la variabilidad de la precipitación condiciona fuertemente todas las actividades socioeconómicas en las islas, además de los procesos naturales relacionados con la fauna y la flora terrestre. La magnitud del efecto puede variar dependiendo de la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones, así como de la infraestructura y la gestión del agua en la región.

Debido a los limitados recursos de agua dulce (Jay-Pang, 2020), la cantidad y la distribución temporal de la lluvia son factores críticos para las principales actividades socioeconómicas de las islas. Los factores socioeconómicos, como la desigualdad de ingresos y el acceso a los recursos, pueden influir en cómo las lluvias afectan a diferentes comunidades de las islas (Velásquez, 2019), especialmente las más vulnerables, que pueden ser más afectadas por eventos extremos de precipitación como las sequías. Las lluvias deficitarias generan tensiones entre la población residente y el creciente turismo de sol y playa (Velásquez, 2019; James y Barrios, 2020; Guerrero, 2019). Además, la escasez de lluvia impacta fuertemente a la agricultura (Aguilera Díaz, 2010; Ministerio de Cultura y Fundación ACUA, 2016) y la ganadería de la región (Solarte, Zapata y Zuluaga, 2008). Si bien estas actividades pueden suplir la escasez con riego proveniente de agua de pozos (Correa, 2006; Rodríguez, 2004; Botett y Lowy 2009), los costos de la infraestructura y la falta de planeación han desfavorecido el desarrollo de esta solución.

La ocurrencia de tormentas extremas y el exceso de lluvia también causan problemas (Gobernación del Departamento de Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2012). Las tormentas muy intensas pueden alterar los planes de viaje, dañar la infraestructura y provocar cancelaciones, impactando negativamente el turismo. Este tipo de tormentas puede causar inundaciones y deslizamientos de tierra y es uno de los factores que más contribuyen a la erosión del suelo, un problema importante para la agricultura y los ecosistemas. Las precipitaciones excesivas acumuladas durante períodos relativamente largos (rachas) pueden afectar el rendimiento de los cultivos y el bienestar animal, así como la producción local de alimentos y los precios. Por otra parte, el estancamiento de aguas en épocas de lluvias insuficientes puede favorecer la aparición de enfermedades debido a la proliferación de vectores como los mosquitos (Acosta

et al., 2015; Gobernación del Departamento de Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2012). Caracterizar la variabilidad pluviométrica histórica es clave para avanzar en el desarrollo de modelos de pronóstico que sirvan de insumo para la toma de decisiones en la gestión de la salud humana, animal y vegetal en las islas.

El primer reporte cuantitativo sobre la precipitación en el archipiélago es el de Vergara y Velasco (1888), según el cual se presentan dos temporadas de lluvia, una seca de enero a abril y la lluviosa de mayo a diciembre. Este autor reporta una media de 240 días de lluvia al año que dejan una cantidad de precipitación de «algo más de 11 metros cúbicos de agua»; evidentemente hay un error en la cantidad porque está expresada como volumen y no como lámina de agua.

Según Diezemann y Delgado (1957), la precipitación media anual (MAP) es de 1500 mm con una temporada seca de enero a abril, una de lluvia moderada de mayo a agosto y una de lluvias fuertes de septiembre a diciembre. A pesar de que sus datos son 1681 mm en 1934 y 1748 mm en 1940, que en promedio son 1715 mm. Diezemann y Delgado (1957) se basan en los datos del Ministerio de Agricultura reportados por Hubach Eggers (1955, 1956), quien calcula una MAP de 1700 mm.

Instalada en enero de 1958, según la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la estación Aeropuerto Sesquicentenario es la más antigua en la actual red de esta entidad. La serie de precipitaciones de esta estación ha sido estudiada reiteradamente. Entre estos estudios destacamos los trabajos de Rangel (1985), Valencia y Osorio (1999) y Carmona et al. (2010). Rangel (1985) reporta una MAP de 2100 mm calculada en el período 1961-1984 (su gráfica, tomada del HIMAT, dice 1947 mm) distribuida de forma unimodal a lo largo del año. Valencia y Osorio (1999) reportan 1897 mm para el período 1958-1997 distribuida en régimen unimodal (con base en series mensuales usando reconstrucción de datos faltantes).

La estación Aeropuerto El Embrujo de Providencia fue instalada en enero de 1973 (Ideam). No hay muchos estudios de precipitación en esta estación. Algunos valores de MAP en la literatura son 1681 mm en el período 1973-2006 (Linares y Fandiño, 2009) y 1632 mm durante 1974-2009 (Ruiz y Molano-González, 2017) y 1881 mm (TYLIN, 2017). Linares y Fandiño (2009) reportan que la precipitación anual ha ido en aumento desde 1998 hasta 2009.

La estacionalidad en San Andrés y Providencia ha sido descrita como *unimodal* o *monomodal* (Silva et al., 2017; Parra et al., 2009; Gobernación del Departamento de Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2012), es decir,

durante el año ocurren dos temporadas (o estaciones), una de alta precipitación y otra de baja. Estas descripciones se han hecho con base en series de precipitación en resolución mensual. En este artículo evaluamos la variabilidad de la precipitación anual, el régimen pluviométrico en resoluciones diaria y mensual, las alteraciones del ciclo anual con las fases del fenómeno ENSO y las tendencias de largo plazo en la precipitación mensual y anual en las islas de Providencia y San Andrés. La aproximación al ciclo anual en resolución diaria permite hacer un diagnóstico más preciso de la estacionalidad que en la resolución mensual.

En síntesis, es esencial una adecuada gestión de riesgos para enfrentar eventos extremos de precipitación, incluyendo los de corta duración como las tormentas intensas y los de larga duración como las sequías. Esto requiere sistemas de alerta temprana y planes de respuesta a emergencias para proteger a los habitantes, la infraestructura y la economía de las islas. El insumo primario para todo ello es el conocimiento detallado de los patrones de

variabilidad temporal de la precipitación. El objetivo de este artículo es generar ese insumo caracterizando estadísticamente los patrones de variabilidad de la precipitación en escalas diaria, mensual, estacional, anual e interanual.

Datos

La red de estaciones del IDEAM tiene nueve estaciones con registros de precipitación diaria en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Figura 1). En la Tabla 1 se presentan los detalles de cada estación, incluyendo sus coordenadas y el período de registro. Con base en la longitud de los registros de estas estaciones decidimos estudiar el período común entre 1988 y 2022 de siete estaciones, descartando las estaciones Bowdon-Embalse (17027010) en Providencia y Aeropuerto Sesquicentenario (17015020) en San Andrés. De las siete estaciones estudiadas, cuatro están ubicadas en Providencia y tres en San Andrés.

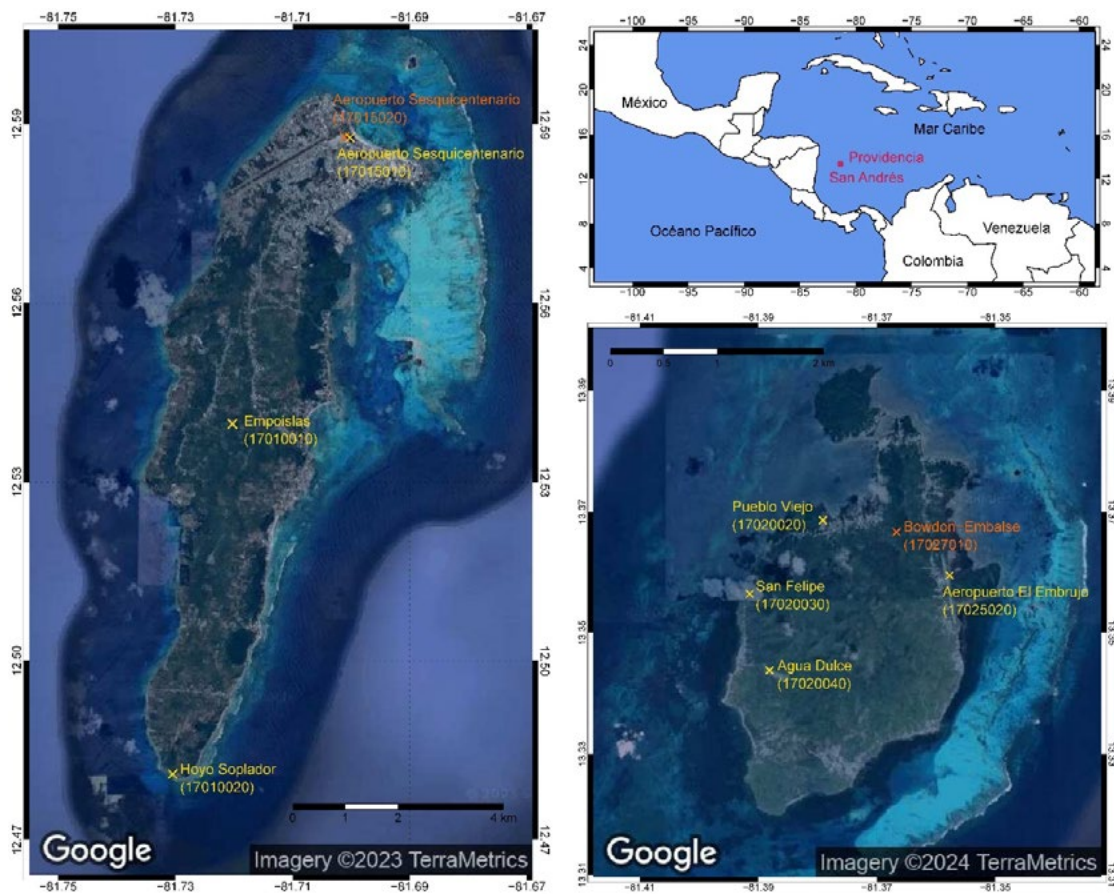


Figura 1. Ubicación de las estaciones de observación de la precipitación diaria del IDEAM en las islas de San Andrés (izquierda) y Providencia (derecha). Las estaciones color naranja no se analizaron por la baja cantidad de registros en el período de estudio.

Tabla 1. Estaciones pluviométricas de la red del IDEAM en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, en orden decreciente de latitud.

Estación	Código	Isla	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m]	Período de registro	Período de análisis
Pueblo Viejo	17020020	Providencia	-81.379	13.369	2.0	1973-2023	1988-2022
Bowdon-Embalse	17027010	Providencia	-81.367	13.367	3.0	1973-1986	
Aeropuerto El Embrujo	17025020	Providencia	-81.358	13.360	7.0	1973-2023	1988-2022
San Felipe	17020030	Providencia	-81.391	13.356	12.0	1973-2020	1988-2022
Agua Dulce	17020040	Providencia	-81.388	13.344	95.0	1986-2023	1988-2022
Aeropuerto Sesquicentenario	17015010	San Andrés	-81.701	12.588	1.0	1962-2023	1988-2022
Aeropuerto Sesquicentenario	17015020	San Andrés	-81.701	12.588	3.0	2005-2021	
Empoislas	17010010	San Andrés	-81.720	12.540	80.0	1974-2022	1988-2022
Hoyo Soplador	17010020	San Andrés	-81.730	12.481	2.0	1986-2020	1988-2022

Con el fin de hacer una revisión de la calidad de las series, se calcularon los parámetros que se presentan en la Tabla 2. La cantidad de días del período de estudio es 12784. La tercera y la cuarta columna muestran la cantidad de datos faltantes de cada serie durante el período de estudio en términos absolutos (columna 4) y expresado como porcentaje (columna 5). La columna 6 indica la cantidad de datos de cada serie. Las columnas 7 a 10 muestran la ocurrencia, absoluta y

relativa, de las etiquetas «Estimado» y «Dudoso» en el campo «Calificador» asociado a cada registro en la base de datos que se descarga del portal del IDEAM. La ocurrencia de datos dudosos y estimados es muy baja. En cambio, la cantidad de datos faltantes es un poco elevada en algunas estaciones. A pesar de ello, es posible llevar a cabo el análisis de variabilidad propuesto en estos siete sitios.

Tabla 2. Control de calidad de las series de precipitación diaria en los siete sitios de estudio.

Sitio	Código	N.º días 1988-2022	N.º faltantes	f. faltantes	N.º Datos	N.º Estimado	f. Estimado	N.º Dudoso	f. Dudoso
Pueblo Viejo	17020020	12784	1379	10.8 %	11396	1	0.0 %	2	0.0 %
Aeropuerto El Embrujo	17025020	12784	1816	14.2 %	10968	0	0.0 %	0	0.0 %
San Felipe	17020030	12784	1440	11.3 %	11340	2	0.0 %	0	0.0 %
Agua Dulce	17020040	12784	1300	10.2 %	11474	1	0.0 %	0	0.0 %
Aeropuerto Sesquicentenario	17015010	12784	954	7.5 %	11830	0	0.0 %	0	0.0 %
Empoislas	17010010	12784	1012	7.9 %	11495	4	0.0 %	273	2.4 %
Hoyo Soplador	17010020	12784	1674	13.1 %	10935	2	0.0 %	158	1.4 %

Métodos

Las series diarias se agregaron a la resolución mensual sumando los valores diarios de precipitación de cada mes. En este procedimiento, la existencia de datos faltantes en las series diarias tiene uno de estos dos efectos sobre las series mensuales: a) datos faltantes por no poder calcular la suma de todos los días del mes; b) datos de precipitación mensual con sesgo negativo por sumar solo los días del mes con dato. Este problema suele tener varias soluciones:

- Trabajar con series mensuales con una cantidad importante de datos faltantes. Esta solución es inconveniente por la reducción del tamaño de las muestras estadísticas.
- Trabajar con series mensuales con datos con sesgo negativo. Esta solución es inconveniente porque dicho sesgo se puede propagar a los resultados.
- Reconstruir los datos faltantes. Existen diversos métodos para hacer esta reconstrucción, desde muy simples, como las interpolaciones lineales, hasta muy sofisticados, como las redes neuronales.

Nuestro interés no es obtener la precipitación en cada día de los días faltantes, sino la suma de ellos para poder calcular la precipitación mensual sin un sesgo negativo. Para resolver el problema, asumimos que la función de distribución de probabilidad de la lluvia diaria es la misma para todos los días de cada mes. Entonces, corregimos la suma mensual incompleta (y sesgada negativamente) por el factor $nm/$

($nm-nf$), donde nm es el número de días calendario del mes y nf el número de días faltantes en dicho mes.

Esta corrección se va haciendo más delicada a medida que nf crece, ya que se va reduciendo el tamaño de la muestra para calcular la precipitación media diaria. En este estudio límite arbitrario de 4 días faltantes como máximo para hacer este procedimiento. En los meses con más de 4 días faltantes no se calculó la precipitación mensual, dejándolos como meses faltantes.

De forma similar, las series mensuales se agregaron a la resolución anual sumando la precipitación mensual de los meses de cada año calendario. Esta operación se hizo solo cuando no hay ningún mes con dato faltante en el año; en caso contrario, se dejó el año con dato faltante.

El régimen pluviométrico se caracterizó usando el método de la curva de masa del ciclo anual promedio propuesto por Urrea, Ochoa y Mesa (2019). Estos autores plantean la existencia de cuatro tipos de régimen pluviométrico en Colombia, los clásicos unimodal y bimodal, y además el régimen mixto y el no estacional. Por medio de interpolaciones lineales de la curva de masa del ciclo anual promedio en resolución diaria se identifican, para cada temporada, los parámetros día de inicio (SOS , de la expresión en inglés *Start of Season*), la duración (DOS), la intensidad media diaria (I) y la cantidad de precipitación (P , que puede expresarse de forma absoluta o como fracción de MAP).

Las alteraciones del ciclo anual de precipitación mensual durante las fases del fenómeno ENSO se analizaron filtrando las series según las fases determinadas por el *Oceanic Niño Index* (ONI) (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Cuando la muestra de la variable precipitación mensual para un sitio, un mes y una fase, tiene más de cinco datos, se estiman los cuartiles de la distribución y se presentan como diagramas de cajas y bigotes; en caso contrario, se dibujan únicamente los puntos (figura 2).

La existencia de tendencias de largo plazo en las series se evaluó usando la prueba de Mann-Kendall modificada por Hamed y Rao (1998) y la magnitud de las tendencias usando el estimador de pendiente de Sen (1968). Este análisis se les hizo a las series anuales de la precipitación mensual y la precipitación anual de cada sitio. Es decir, trece series en cada sitio.

Resultados e interpretación

Precipitación anual

En San Andrés la MAP es mayor en Empoislás (1943 mm), localizada en el centro de la isla y con la mayor elevación (80 m) entre las estaciones analizadas. En la estación Aeropuerto Sesquicentenario, al norte de la isla, la MAP es semejante, con un valor de 1932 mm. La MAP es considerablemente menor (1590 mm) en Hoyo Soplador en el extremo sur de la isla.

En Providencia la MAP es mínima en la estación más al norte en Pueblo Viejo (1581 mm) y máxima en la estación sur en Agua Dulce (1817 mm). En las estaciones Aeropuerto El Embrujo y San Felipe la MAP es intermedia y muy similar (1781 mm y 1751 mm), a pesar de estar en costados opuestos de la isla longitudinalmente. Excepto en Pueblo Viejo, estos resultados son mayores que el reportado por Linares y Fandiño (2009) de 1681 mm en Aeropuerto El Embrujo.

Régimen de precipitación

Los resultados de la interpolación de la curva de masa asumiendo dos temporadas en el año (una seca y una húmeda) a la manera de Urrea, Ochoa y Mesa (2019), se presentan en la Tabla 3 y se pueden observar en las gráficas de la primera columna de la Figura 2. En nuestra apreciación, estas interpolaciones no son del todo satisfactorias, especialmente en Agua Dulce, donde la temporada húmeda modelada inicia en el día del año número 231. La Tabla 4 y las gráficas de la segunda columna de la Figura 2 muestran los resultados de la interpolación asumiendo cuatro temporadas en el año. Las curvas de masa modeladas son mucho más ajustadas a las observadas que en la modelación de dos temporadas. Estos resultados sugieren que el régimen de precipitación en San Andrés y Providencia es de tipo mixto (Urrea, Ochoa y Mesa, 2019) en lugar de unimodal como se encuentra frecuentemente en la literatura (una excepción es TYLIN (2017), que reporta tres temporadas: «de precipitación», «de menor pluviosidad» y «período seco»). Este tipo de régimen se ha observado en otros lugares del Caribe como Urabá (Urrea, Ochoa y Mesa, 2019). En la Guajira también puede observarse la ocurrencia de este tipo de régimen en algunos años, a pesar de que la gran cantidad de ceros en las series diarias de este lugar dificultan el procesamiento y la interpretación de los resultados (Urrea, 2017).

Los resultados de la interpolación de la curva de masa asumiendo dos y cuatro temporadas en el año se presentan, respectivamente, en las Tablas 2 y 3 y la primera y segunda columnas de la figura 2. Como puede observarse, la curva

de masa interpolada (azul) se ajusta casi perfectamente a la empírica (gris) cuando se asumen cuatro temporadas, pero con desviaciones importantes cuando se asumen dos, lo cual se refleja en la raíz de error cuadrático medio (RMSE). En la clasificación de Urrea, Ochoa y Mesa (2019) hay dos tipos de régimen con cuatro temporadas, el bimodal y el mixto. En el primero ocurren dos temporadas de altas y dos de bajas precipitaciones muy claramente diferenciadas. En el segundo hay una temporada de baja y tres de alta precipitación. Cuando la temporada intermedia es de menor intensidad media que las otras dos, se ha conocido con nombres como «sequía de mitad del verano» (MSD) o «veranillo» (Zhao et al., 2020; Karnauskas, Seager, Giannini, y Busalacchi, 2013).

Los ciclos anuales en resolución mensual (figura 2, tercera columna) sugieren la existencia del veranillo. Sin embargo, las interpolaciones para cuatro temporadas no lo capturan, y muestran tres temporadas de alta precipitación entre mediados de abril y mediados de enero. De esas tres temporadas la del medio (temporada 3 en la tabla 3) es la de mayor intensidad. Este rasgo parece coherente con los patrones que han encontrado algunos autores para algunos sitios de la región occidental del Gran Caribe (Martínez et al., 2019). La explicación física de este patrón está por fuera del alcance de este artículo. El lector interesado puede encontrar estos análisis en fuentes como por ejemplo Martínez et al. (2019), Gallego et al. (2019) y Herrera, Magaña, y Caetano (2015).

Tabla 3. Parámetros del régimen estacional para interpolación asumiendo dos temporadas en el año.

Sitio	Código	MAP [mm]	SOS ₁	SOS ₂	DOS ₁ [d] ¹	DOS ₂ [d] ²	P ₁ [%]	P ₂ [%]	i ₁ [mm/d]	i ₂ [mm/d]
Pueblo Viejo	17020020	1581.1	22	156	134	231	13.99	86.01	1.71	6.10
Aeropuerto El Embrujo	17025020	1781.4	23	136	113	252	7.34	92.66	1.16	6.54
San Felipe	17020030	1751.4	21	136	115	250	6.60	93.40	1.02	6.65
Agua Dulce	17020040	1817.2	231	338	107	258	56.23	43.77	9.11	2.94
Aeropuerto Sesquicentenario	17015010	1932.0	8	136	128	237	10.05	89.95	1.53	7.38
Empoislás	17010010	1942.8	15	136	121	244	8.61	91.39	1.43	7.51
Hoyo Soplador	17010020	1590.2	15	134	119	246	7.94	92.06	1.08	6.07

Tabla 4. Parámetros del régimen estacional para interpolación asumiendo cuatro temporadas en el año.

Sitio	Código	MAP [mm]	SOS ₁	SOS ₂	SOS ₃	SOS ₄	DOS ₁ [d]	DOS ₂ [d]	DOS ₃ [d]	DOS ₄ [d]	P ₁ [%]	P ₂ [%]	P ₃ [%]	P ₄ [%]	i ₁ [mm/d]	i ₂ [mm/d]	i ₃ [mm/d]	i ₄ [mm/d]
Pueblo Viejo	17020020	1581.1	14	134	269	334	120	135	65	45	9	40	39	12	1.19	4.86	9.77	4.52
Aeropuerto El Embrujo	17025020	1781.4	19	129	264	334	110	135	70	50	7	39	42	12	1.10	5.14	10.71	4.32
San Felipe	17020030	1751.4	14	129	264	339	115	135	75	40	6	40	44	10	0.96	5.30	10.42	4.31
Agua Dulce	17020040	1817.2	14	129	264	339	115	135	75	40	7	36	46	10	1.09	4.67	10.62	4.49
Aeropuerto Sesquicentenario	17015010	1932.0	14	134	269	334	120	135	65	45	8	47	34	11	1.35	6.75	10.23	4.57
Empoislás	17010010	1942.8	14	129	279	339	115	150	60	40	7	50	33	10	1.30	6.71	10.91	4.87
Hoyo Soplador	17010020	1590.2	19	134	269	344	115	135	75	40	7	46	37	9	1.03	5.55	8.02	3.78

Fenómeno ENSO

Las anomalías de la precipitación mensual durante las fases del ENSO son apreciables entre marzo y abril y en el mes de octubre. Durante los demás meses no hay señales claras de alteraciones de la precipitación mensual. En octubre se observan las mayores anomalías positivas durante La Niña, y en menor grado también

entre marzo o junio y agosto. Las anomalías más fuertes durante la fase El Niño ocurren entre marzo y abril en Hoyo Soplador, donde la precipitación se reduce considerablemente. En Providencia las alteraciones durante El Niño son negativas (aunque bajas) en el segundo semestre del año.

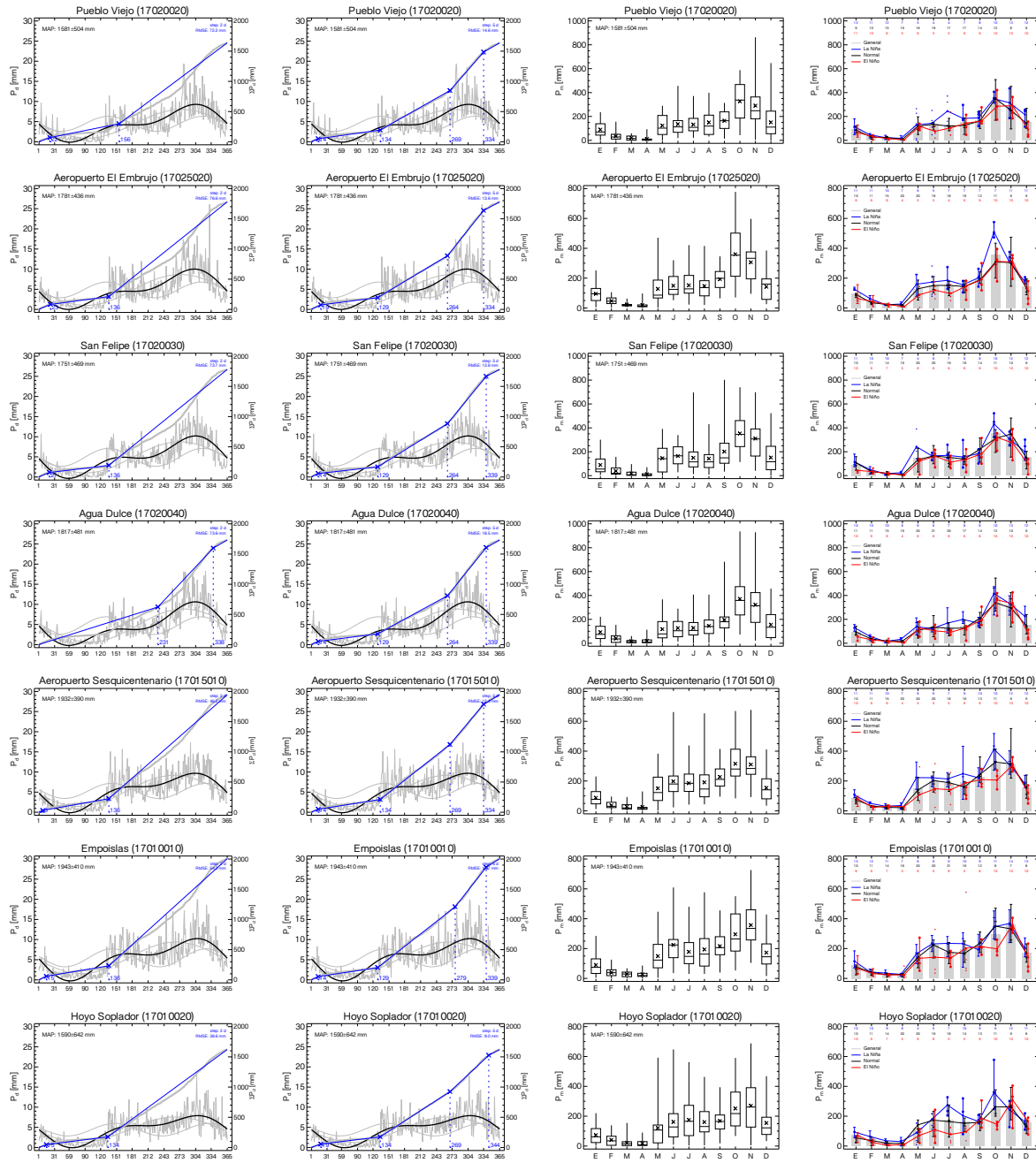


Figura 2. Interpolación de la curva de masa del ciclo anual promedio para dos (primera columna) y cuatro (segunda columna) temporadas en el año. Ciclo anual en resolución mensual (tercera columna) y alteraciones del ciclo anual en resolución mensual (cuarta columna).

Tendencias de largo plazo

En las series de precipitación anual en San Andrés el estimador de pendiente de Sen (1968) dio positivo en la estación Aeropuerto Sesquicentenario (18 mm/década) y negativo en Empoislás (97 mm/década) y Hoyo Soplador (-316 mm/década). Aunque la magnitud de la tendencia en Hoyo Soplador es grande, la prueba de Mann-Kendall no rechazó la hipótesis de estacionariedad con un valor de p de 0.2022 (figura 1). Por lo tanto, posiblemente la magnitud de esta tendencia se debe más a la alta variabilidad interanual y el alto coeficiente de variación de esa serie.

Linares y Fandiño (2009) sugirieron que la precipitación anual en la estación Aeropuerto El Embrujo estaba aumentando desde 1988. Ese diagnóstico es consistente con el resultado que encontramos para el período 1988-2022 para esta serie, con una pendiente del orden de 174 mm/década (Figura S1). En Agua Dulce, el sitio más lluvioso de Providencia, la tendencia es positiva de 83 mm/década mientras que, en Pueblo Viejo, el sitio más seco, la tendencia es negativa de 29 mm/década. En San Felipe la pendiente de la serie anual es de -100 mm/década. En síntesis, la prueba de Mann Kendall modificada por Hamed y Rao (1998) dio como resultado que no se rechaza la hipótesis nula de estacionariedad en ninguna de las series de precipitación anual.

De las 84 ($12 \times 7 = 84$) series mensuales de precipitación mensual analizadas, la prueba de Mann-Kendall rechazó la hipótesis nula de estacionariedad (para $\alpha = 0.05$) en 12 casos, con 6 tendencias positivas y 6 negativas. En Providencia hay tendencias negativas en febrero en San Felipe (-6 mm/década) y en febrero y marzo en Agua Dulce (-2 y -1 mm/década) y positivas en abril y mayo en Pueblo Viejo (3 y 14 mm/década), enero y septiembre en Aeropuerto El Embrujo (26 y 42 mm/década) y octubre en Agua Dulce (75 mm/década). En San Andrés encontramos tendencia positiva en Aeropuerto Sesquicentenario en diciembre (5 mm/década) y negativas en Hoyo Soplador en abril, junio y agosto (-6, -42 y -27 mm/década).

Conclusiones

Este trabajo caracterizó estadísticamente la variabilidad de la precipitación en las islas de San Andrés y Providencia en escalas diaria, mensual, estacional, anual e interanual. La precipitación media anual más baja entre los sitios estudiados es de algo menos de 1600 mm en ambas islas y ocurre en la estación más al norte de Providencia que es Pueblo Viejo y en la más al sur de San Andrés que es Hoyo Soplador. Los demás

sitios presentan una precipitación media anual del orden de 1800 mm en Providencia y de 1950 mm en San Andrés. El análisis de largo plazo muestra que, de las tres series de San Andrés, dos presentan tendencias negativas con magnitudes importantes, -97 mm/década en Empoislás y -316 mm/década en Hoyo Soplador.

El tipo de régimen que mejor describe la variabilidad estacional de la lluvia diaria en las islas es el mixto, con la temporada más seca entre mediados de enero y mediados de mayo (~116 días, ~1.2 mm/día), cuando comienza una temporada moderadamente húmeda que va hasta finales de septiembre (~137 días, ~5.6 mm/día). Desde entonces hasta principios de diciembre ocurre la estación más húmeda del año (~69 días, ~10.1 mm/día). Finalmente, entre diciembre y mediados de enero hay una temporada de lluvia moderada (~43 días, ~4.4 mm/día).

Durante la ocurrencia de las fases del ENSO, la lluvia mensual se altera más en San Andrés que en Providencia. Las altas precipitaciones de octubre suelen ser aún más altas durante La Niña y disminuir durante El Niño. Algo similar ocurre durante la temporada moderada de mitad del año calendario. La lluvia de septiembre es particularmente insensible a las fases del ENSO.

Las series de precipitación anual no presentan tendencias de largo plazo significativas ($\alpha = 0.05$). Sin embargo, con la excepción de la estación Empoislás, en el centro de la isla de San Andrés, sí se encontraron tendencias significativas ($\alpha = 0.05$) en la precipitación de algunos meses en todas las estaciones. Estos resultados sugieren la ocurrencia de cambios en la fase del ciclo anual de precipitación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Minciencias, la Universidad EIA, la Universidad Nacional de Colombia e Interconexión Eléctrica S.A. por el apoyo financiero a través de contrato 133385271391.

Información suplementaria

La sección «material suplementario» presenta gráficas de las series de tiempo diaria, mensual y anual de todos los sitios de estudio, así como los resultados del análisis de tendencias de largo plazo de las series anuales de precipitación anual y de cada mes para cada sitio.

Referencias

- Acosta, I., Arias, L., Cristancho, V., Lizarazo, C., Montes, L., Morales, A., Reyes, J. y Ruíz, O. A. (2015). Abundancia y distribución de mosquitos (Diptera: Culicidae) en San Andrés Islas, Colombia. 10° Encuentro Facultad de Ciencias-UPTC, 118-121. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/6922>
- Aguilera Díaz, M. (2010). Geografía económica del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. *Documentos de Trabajo Economía Regional*, 133. <https://www.banrep.gov.co/es/geografia-economica-del-archipiélago-san-andrés-providencia-y-santa-catalina>
- Botett, J. A., y Lowy, P. D. (2009). Diagnóstico ambiental de los recursos agua y suelo en los sistemas agrícolas de San Andrés Isla, como miras a la aplicación de conceptos agroecológicos. *Cuadernos del Caribe*, 7(13), 24-45. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ccaribe/article/view/41326>
- Carmona, J. A., Poveda, G., Vélez, M.V., Bedoya, M., y Vélez, J. I. (2010). Caracterización de la climatología y los efectos del ENSO sobre la isla de San Andrés, Colombia. xxiv Congreso Latinoamericano de Hidráulica. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8021>
- Correa, D. L. (2006). Caracterización y diagnóstico participativo de suelos de algunas unidades productivas en San Andrés isla. *Cuadernos del Caribe*, 4(7), 103-116. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ccaribe/article/view/41724>
- Diezemann, W. y Delgado, C. I. (1957). Aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la isla de San Andrés. *Boletín Geológico*, 5(1), 85-106 <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/356>
- Departamento Nacional de Planeación. (1992). Plan para el Departamento de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/2594.pdf>
- Gallego, D., García, R., Gómez, F. de P., Ordoñez, P. y Ribera, P. (2019). Tracking the moisture transport from the Pacific towards Central and northern South America since the late 19th century. *Earth System Dynamics*, 10(2), 319-331. <https://doi.org/10.5194/esd-10-319-2019>
- Gobernación del Departamento de Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (2012). Plan Departamental de Gestión del Riesgo. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Colombia). PNUD-UNGRD. San Andrés. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/383/PDGR%20San%20Andres.pdf>
- Gobernación del Archipiélago. (2020). Plan departamental de extensión agropecuaria 2020-2023. <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/PublishingImages/Paginas/PDEA/San%20Andres%20Islas.pdf>
- Guerrero, T. (2019). Crisis del agua, turismo y variabilidad climática en la isla de San Andrés. *Turismo y Sociedad*, 26, 127-154. <https://doi.org/10.18601/01207555.n26.06>
- Gutiérrez Escobar, L. (2019). Diversidad biocultural, agricultura raizal y soberanía alimentaria en San Andrés y Providencia (Colombia). *Tabula Rasa*, 32, 195-225. <https://doi.org/10.25058/20112742.n32.13>
- Hamed, K.H., y Rao, A.R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Herrera, E., Magaña, V., y Caetano, E. (2015). Air-sea interactions and dynamical processes associated with the midsummer drought. *International Journal of Climatology*, 35(7), 1569-1578. <https://doi.org/10.1002/joc.4077>
- Hubach Eggers, E. (1955). Aspectos geográficos y geológicos y recursos de las islas de San Andrés y Providencia, intendencia de San Andrés y Providencia. Conferencia leída en la Academia Colombiana de Historia. Informe 1121. Ingeominas. <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=10971>
- Hubach Eggers, E. (1956). Aspectos geográficos y geológicos y recursos de las islas de San Andrés y Providencia. *Cuadernos de Geografía de Colombia*, 12.
- James, J. L., y Barrios, D. J. (2020). Valoración del uso del agua en la isla de San Andrés: turistas, hoteles y viviendas turísticas. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 18(2), 293-308. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2020.18.020>
- Jay-Pang, R. (2020). Fi ui uol yaaddem an fi ui briiz bludem San Andrés, Providencia y Santa Catalina: importancia de los conocimientos ancestrales para la construcción de la vivienda creole adaptada a los fenómenos atmosféricos, frentes fríos y ciclones tropicales. *El Planeta Pide La Palabra: Diálogos Entre Saberes Ancestrales y La Ciencia de Los Ciclones Tropicales*, 19. <https://catedra-raizal.org/articulos-y-ponencias/>
- Karnauskas, K.B., Seager, R., Giannini, A., y Busalacchi, A.J. (2013). A simple mechanism for the climatological midsummer drought along the Pacific coast of Central America. *Atmósfera*, 26(2), 261-281. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71075-0](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71075-0)
- Linares, J.R., y Fandiño, M.C. (2009). Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, islas de la Vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe suroccidental. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 33(126), 5-15. https://www.accefyn.com/revista/Vol_33/126/5-16.pdf
- Martinez, C., Goddard, L., Kushnir, Y., y Ting, M. (2019). Seasonal climatology and dynamical mechanisms of rainfall in the Caribbean. *Climate Dynamics*, 53(1-2), 825-846. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04616-4>
- Ministerio de Cultura, y Fundación ACUA. (2016). Between Land & Sea. Traditional food & cooking from San Andrés, Old Providence & Santa Catalina Islands. Ministerio de Cultura. <https://patrimonio.mincultura.gov.co/SiteAssets/Paginas/Publicaciones-biblioteca-cocinas/Libro%20San%20Andres%cc%81s%20bajas.pdf>

- Parra, O. J., Cayón, D. G. y Polanía, J. (2009). Descripción morfoagronómica de materiales de plátano (*Musa AAB*, *ABB*) y banano (*Musa AAA*) cultivados en San Andrés Isla. *Acta Agronómica*, 58(4), 292-298. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/12533
- Quiceno, M. P., Ospina, D., Palacios, S., Ramos, P., Romero, L. P. y Restrepo, S. (2009). Caracterización de la biodiversidad y lineamientos generales para la formulación de un plan de manejo del Parque Natural Regional The Peak en la isla de Providencia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Coralina. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31194>
- Rangel, E. (1985). El clima de San Andrés (Isla). *Atmósfera*, 3, 33-39.
- Rodríguez, A.S. (2004). Estrategias de uso, manejo y conservación de recursos agrícolas en San Andrés Isla. *Cuadernos del Caribe*, 3(5), 33-40. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ccaribe/article/view/41756>
- Ruiz, J., y Molano-González, N. (2017). Dinámica de la precipitación, la temperatura y la razón de aridez (1973-2011) en un escenario de cambio global en la isla de la vieja Providencia, Colombia: ¿qué está cambiando? *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 26(1), 25-35. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v26n1.56019>
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.2307/2285891>
- Silva, M., Quiroz, J.A., Hoyos, L. M., Yepes R., F. C., Maya A., M. F. y Santos M., A. (2017). Coccinélidos depredadores de *Crypticeria multicatrides* (HEMIPTERA: MONOPHEBIDAE) en San Andrés Isla, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, 21(1), 165-173. <https://doi.org/10.17151/bccm.2017.21.1.13>
- Solarte, A. J., Zapata, A. y Zuluaga, A. F. (2008). Propuesta preliminar para discusión: Algunas ideas para la reconversión Ambiental de la Ganadería en la isla de Providencia. <https://observatorio.coralina.gov.co/index.php/es/publicaciones/item/479-propuesta-preliminar-para-discusion-algunas-ideas-para-la-reconversion-ambiental-de-la-ganaderia-en-la-isla-de-providencia>
- TYLIN. (2017). Plan Maestro Aeropuerto El Embrujo de la isla de Providencia, Colombia. Resumen ejecutivo. Aeronáutica Civil. <https://www.aerocivil.gov.co/aeropuertos/Planes%20maestros/PROVIDENCIA%20-%20EL%20EMBRUJO.pdf>
- Urrea, V. (2017). Variabilidad espacial y temporal del ciclo anual de lluvia en Colombia. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín]. Repositorio Institucional Unal. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59836>
- Urrea, V., Ochoa, A. y Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149-4162. <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- Valencia, I.D., y Osorio, F. (1999). Variabilidad climática interanual e interdecadal en la Isla de San Andrés. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 8(1), 136-146. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/71633/>
- Velásquez, C. (2011). La percepción del riesgo de los agricultores de la isla de Providencia y Santa Catalina, frente a huracanes. In R. Román (ed.), *Cultura, Sociedad, Desarrollo e Historia en el Caribe Colombiano*. Universidad Nacional de Colombia.
- Velásquez, C. (2019). Making sense of the 2016 water crisis in San Andres, a Colombian Caribbean Island. *Anais Brasileiros de Estudos Turísticos - ABET*, 59-73. <https://doi.org/10.34019/2238-2925.2018.v8.13868>
- Vergara y Velasco, F. J. (1888). El Archipiélago de San Andrés (las Islas de San Andrés y Providencia): noticia geográfica. Zalamea. <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054colho/id/2288/>
- Zhao, Z., Holbrook, N. J., Oliver, E. C. J., Ballesteros, D., y Vargas-Hernandez, J. M. (2020). Characteristic atmospheric states during mid-summer droughts over Central America and Mexico. *Climate Dynamics*, 55(3-4), 681-701. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05283-6>