



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Variabilidad espacio temporal de la concentración de la precipitación diaria en Colombia

Natalia Pareja Osorio

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de geociencias y medio ambiente
Medellín, Colombia
2018

Variabilidad espacio temporal de la concentración de la precipitación diaria en Colombia

Natalia Pareja Osorio

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director (a):

Ph.D. Andrés Ochoa Jaramillo

Codirector (a):

Ph.D. Blanca Adriana Botero Hernández

Línea de Investigación:

Hidroclimatología

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de geociencias y medio ambiente

Medellín, Colombia

2018

“El hombre se descubre cuando se mide contra un obstáculo”.

Antoine de Saint Exupery

Resumen

El objetivo principal de esta tesis es la caracterización espacial y temporal de la concentración de la precipitación en Colombia mediante el uso del Índice de Gini, el Índice de Concentración, el Índice de Fournier, el Índice Modificado de Fournier y el Índice de Concentración de la precipitación utilizando información de precipitación diaria y mensual según los requerimientos de cada índice. La información fue obtenida de estaciones *in situ* y de la base de datos CHIRPS v2.0.

Los resultados muestran precipitaciones concentradas en el norte del país (región Caribe) donde aproximadamente el 3% de los días lluviosos aporta el 97% del total pluviométrico mientras que en la región Pacífico el 10% del total de días con precipitación aporta el 40% de la lluvia total.

En general, es posible apreciar que la concentración de la precipitación diaria en Colombia, para una escala temporal de largo plazo en el periodo 1981 – 2016, aumenta desde el oriente donde tiene un índice de Gini de 0.66, hasta llegar al piedemonte llanero, la serranía de La Macarena y el piedemonte amazónico al occidente del país donde se tiene una concentración alta con un índice de 0.81; así mismo, la concentración aumenta hacia el norte donde se presentan los valores más elevados (0.98 en la península de La Guajira). En la costa pacífica, en el departamento de Chocó y en parte del departamento de Antioquia se presentan las distribuciones de precipitación más uniformes dentro del país. Se utiliza la prueba de Mann-Kendall para evaluar la tendencia de los índices mencionados encontrando que el 11.65% del total de las estaciones, muestran un aumento en la concentración de la precipitación y un 7.58% de los sitios muestran disminución en el Índice de Gini.

Palabras clave: (Concentración, precipitación, Índice de Gini, tendencia).

Abstract

The main goal of this thesis is the spatial and temporal characterization of the precipitation concentration in Colombia using the Gini Index, the Concentration Index, the Fournier Index, the Modified Fournier Index and the Concentration Index of the precipitation using daily and monthly precipitation information according to the requirements of each index. The information was obtained from stations in situ and from the CHIRPS v2.0 database.

The results show concentrated precipitations in the north of the country (Caribbean region) where approximately 3% of rainy days contribute 97% of the total rainfall while in the Pacific region 10% of total days with precipitation contribute 40% of the total rain.

In general, it is possible to appreciate that the concentration of daily rainfall in Colombia, for a long-term time scale in the period 1981 - 2016, increases from the east where it has a Gini index of 0.66, until it reaches the Llanero foothills, the La Macarena mountains and the Amazon foothills to the west of the country where it has an index of 0.81; likewise, the concentration increases towards the north where the highest values are presented (0.98 in La Guajira peninsula). On the Pacific coast, in the department of Chocó and in part of the department of Antioquia, the most uniform precipitation distributions, within the country, take place.

The Mann-Kendall test is used to evaluate the tendency of the afore mentioned indices, finding that 11.65% of the total stations show an increase in the concentration of precipitation and 7.58% of the sites show a decrease in the Gini Index.

Keywords: Concentration, precipitation Gini Index, trend

Contenido

1. Estado de la investigación sobre concentración de la precipitación.....	3
2. Datos.....	8
2.1 IDEAM.....	8
2.2 CHIRPS v2.0.....	8
3. Metodología.....	10
3.1 Índice de Fournier.....	10
3.2 Índice Modificado de Fournier.....	11
3.3 Índice de Concentración de la Precipitación.....	12
3.4 Índice de Gini.....	13
3.5 Índice de Concentración.....	14
3.6 Tendencias a largo plazo.....	15
3.7 Correlación.....	17
4. Resultados.....	18
4.1 Generalidades.....	18
4.2 Distribución espacial de la concentración de la precipitación.....	20
4.2.1 Distribución espacial del Índice de Gini con datos del IDEAM.....	21
4.2.2 Distribución espacial del Índice de Gini con datos CHIRPS v2.0.....	24
4.2.3 Distribución espacial del IF, IMF, ICP e IC con datos del IDEAM.....	26
4.2.4 Correlación de los índices con variables geográficas y pluviométricas.....	35
4.3 Variabilidad temporal de la concentración de la precipitación.....	42
4.3.1 Tendencia a largo plazo del Índice de Gini según prueba Mann-Kendall.....	42
4.3.2 Tendencia a largo plazo del Índice de Concentración de la Precipitación según prueba Mann-Kendall.....	44
4.3.3 Tendencia a largo plazo del Índice de Fournier y el Índice Modificado de Fournier según prueba Mann-Kendall.....	46
4.3.4 Tendencia a largo plazo del número de días de precipitación según prueba Mann-Kendall.....	49
4.3.5 Ciclo anual.....	50
4.4 Influencia de los días sin precipitación en el cálculo de la concentración.....	63
5. Conclusiones.....	68
6. Referencias.....	73

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3.1 Curva de Lorenz.....	14
Figura 4.1: Distribución espacial de las estaciones de precipitación utilizadas.....	19
Figura 4.2: Histograma de frecuencias de la precipitación media anual.	20
Figura 4.3: Índice de Gini largo plazo con información IDEAM.....	21
Figura 4.4: Curva de Lorenz para las estaciones Junín y Jasay.....	23
Figura 4.5: Distribución por regiones del Índice de Gini para datos IDEAM.....	24
Figura 4.6: Índice de Gini largo plazo con información CHIRPS v2.0.	25
Figura 4.7: Diagrama de caja por regiones para el Índice de Fournier.	27
Figura 4.8: Índice de Fournier con información IDEAM.	28
Figura 4.9: Diagrama de caja por regiones para el Índice Modificado de Fournier.	30
Figura 4.10: Índice Modificado de Fournier con información IDEAM.	31
Figura 4.11: Diagrama de caja por regiones para el Índice de Concentración de la precipitación.....	32
Figura 4.12: Índice de Concentración de la Precipitación con información IDEAM.....	33
Figura 4.13: Diagrama de caja por regiones para el Índice de Concentración.....	34
Figura 4.14: Índice de Concentración con información IDEAM.....	35
Figura 4.15: Gráficos de dispersión entre los índices y la latitud de las estaciones.	37
Figura 4.16: Gráficos de dispersión entre los índices y la longitud de las estaciones.....	38
Figura 4.17: Gráficos de dispersión entre los índices y la elevación de las estaciones. ..	39
Figura 4.18: Gráficos de dispersión entre los índices y días de lluvia al año en las estaciones.....	40
Figura 4.19: Gráficos de dispersión entre los índices y la precipitación media anual de las estaciones.....	41
Figura 4.20: Resultados del análisis de tendencias para el Índice de Gini. El tamaño de las flechas es proporcional a la magnitud de la tendencia.	44

Figura 4.21: Resultados del análisis de tendencias para el Índice de Concentración de la Precipitación. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.	46
Figura 4.22: Resultados del análisis de tendencias para el Índice de Fournier. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.	47
Figura 4.23: Resultados del análisis de tendencias para el Índice Modificado de Fournier. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.	48
Figura 4.24: Resultados del análisis de tendencias para los días de lluvia. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.....	50
Figura 4.25: Índice de Gini para la temporada húmeda de los sitios con ciclo anual unimodal con información IDEAM.	52
Figura 4.26: Índice de Gini para la temporada seca de los sitios con ciclo anual unimodal con información IDEAM.	53
Figura 4.27: Índice de Gini para la primera temporada húmeda de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.	55
Figura 4.28: Índice de Gini para la segunda temporada húmeda de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.	56
Figura 4.29: Índice de Gini para la primera temporada seca de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.	57
Figura 4.30: Índice de Gini para la segunda temporada seca de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.	58
Figura 4.31: Ciclo anual región Amazonía con influencia del fenómeno ENSO.	60
Figura 4.32: Ciclo anual región Andina con influencia del fenómeno ENSO.	60
Figura 4.33: Ciclo anual región Caribe con influencia del fenómeno ENSO.....	61
Figura 4.34: Ciclo anual región Orinoquía con influencia del fenómeno ENSO.	62
Figura 4.35: Ciclo anual región Pacífico con influencia del fenómeno ENSO.	63
Figura 4.36: Histograma de frecuencias de las diferencias entre los índices calculados con ceros y sin ceros.	64
Figura 4.37: Diagrama de caja para el índice de Gini por Regiones sin considerar los días sin precipitación (derecha) y considerando los días con precipitación (izquierda).	65
Figura 4.38: Histograma de frecuencias del Índice de Gini con datos IDEAM sin considerar días sin precipitación (arriba) y considerando los días sin precipitación (abajo).	66

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Clasificación del Índice de Fournier (IF).	11
Tabla 3-2: Clasificación del Índice Modificado de Fournier (IMF).	12
Tabla 3-3: Clasificación del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP).	13
Tabla 4-1: Coeficiente de correlación de Spearman y p-value para el Índice de Gini (IG), Índice de Fournier (IF), Índice Modificado de Fournier (IMF), Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) e Índice de Concentración (CI) con factores geográficos y pluviométricos. Valores significativos con $\alpha=0.05$ se muestran en negrita	42

Introducción

De las variables climáticas comunes, la precipitación es la más cambiante en el tiempo y en el espacio, afecta directamente los ciclos naturales de los recursos hídricos y proporciona información sobre el estado del clima (IPCC, 2007), de ahí, que el análisis de la variabilidad espacio temporal de su concentración, suponga un gran interés dentro del ámbito hidrológico.

El estudio de las precipitaciones a escala diaria supone una amplia fuente de información en cuanto a la posibilidad de conocer el comportamiento hidrológico de una zona y caracterizar sus regímenes de precipitación además de suministrar información sobre la frecuencia o número de días de lluvia y el desglose de la cantidad registrada de los días lluviosos. A mayor conocimiento de las variaciones del clima, representado en este caso por el régimen de las precipitaciones, mayor es también el potencial de construir e implementar capacidades adaptativas a las consecuencias que dejan dichas variaciones.

El interés por el análisis de la precipitación no solo se reduce al campo climatológico, sino que también su régimen impacta los ecosistemas, repercutiendo de forma directa en diferentes sectores económicos del país produciendo la pérdida de bienes, así como migraciones masivas, degradación ambiental, escasez de alimentos, energía y agua (Mesa, et al., 2000).

La distribución temporal no uniforme de la precipitación, representada por un alto porcentaje del volumen total de lluvia que cae en unos pocos días, tiene el potencial de causar inundaciones y sequías. También, genera cambios en los regímenes fluviales, la recarga de acuíferos, la disponibilidad de agua y la producción hidroeléctrica.

La agresividad y la concentración de las precipitaciones han sido usadas como índices para evaluar posibles modificaciones en el ciclo del agua y describir procesos hidrológicos y morfológicos (Valdés, et al., 2016), su uso puede dar una idea de la correspondencia entre la capacidad erosiva de la lluvia y la distribución temporal de las precipitaciones. Adicionalmente, el estudio de la variabilidad de la distribución temporal de la precipitación

puede ayudar en la planificación de medidas para la superación de los impactos negativos ocasionados por eventos extremos (Patel, et al., 2015).

A partir del problema de conocer de manera detallada como se distribuye la precipitación, surgen diferentes soluciones, algunas de carácter bidimensional, como el coeficiente de Gini y el Índice de Concentración, que no solo consideran los totales de lluvia, sino que, también, el número de días en que se registran y otras, como el Índice de Fournier, El Índice de Fournier Modificado y el Índice de Concentración de las Precipitaciones que utilizan los valores mensuales de precipitación y su promedio anual.

El objetivo del presente estudio es analizar el comportamiento de la concentración de la precipitación sobre el territorio colombiano, tanto espacial como temporalmente, utilizando información diaria de lluvias proveniente de la base de datos del IDEAM de estaciones *in situ*, así como información satelital de la base de datos CHIRPS v2.0 la cual tiene una resolución espacial de 0.05° y una resolución temporal diaria. Se incluye la información de la base de datos CHIRPS para el análisis de la concentración de la precipitación debido a las ventajas en cuanto a información que presenta esta base de datos respecto a las estaciones del IDEAM en regiones como Amazonía y Orinoquía.

1.Estado de la investigación sobre concentración de la precipitación

En 1950, en un estudio realizado por Olascoaga (1950), en diferentes provincias de Argentina, se introduce el término “intensidad de precipitación” para indicar el número de días que representan la mayor parte de las precipitaciones con el fin de estudiar las variaciones regionales e identificar comportamientos estacionales de la distribución de la precipitación. Adicionalmente, se incluye el uso de curvas de precipitación normalizada que proporciona una gráfica del porcentaje acumulado de días de lluvia contra el porcentaje acumulado de la cantidad de lluvia (Ananthakrishnan, y otros, 1989; Jolliffe, et al., 1996; Olascoaga, 1950).

Durante 1960, fue desarrollado el Índice de Fournier con el fin de identificar la relación entre la erosión del suelo por agua y la precipitación atmosférica (Fournier, 1960).

Dicho índice relaciona la precipitación del mes más lluvioso del año con la precipitación total anual. El resultado de esta relación, da una idea del poder erosivo de la precipitación según la zona en la que sea aplicado. Para 1980, Arnoldus (1980), propone una modificación del Índice de Fournier fundamentado en el hecho que no sólo el mes de mayor precipitación produce erosión superficial, sino que hay meses con menores cantidades de precipitación que también producen erosión.

En 1980, se propone el Índice de Concentración de la Precipitación (PCI por sus siglas en inglés), que nace como una modificación del Índice de Diversificación del Empleo desarrollado por Gibbs y Martin (1962). El PCI es utilizado para caracterizar la concentración mensual de la precipitación en una escala que varía desde menos de 10 para lluvia uniformemente distribuida a 100 para distribución extrema de precipitación mensual (Oliver, 1980).

Basado en el conocimiento del coeficiente de Gini, desarrollado por el italiano Corrado Gini en 1912 para medir la desigualdad económica de los países, Martín-Vide (2004), formuló el Índice de Concentración (CI por sus siglas en inglés) para el estudio de las precipitaciones diarias del litoral mediterráneo español. El CI es un indicador sintético que permite calcular el grado de concentración de las precipitaciones llegando a clasificarlas, según los resultados, como precipitaciones distribuidas o concentradas. Además, el CI es un estimador del grado de agresividad o torrencialidad pluviométrica (Espinoza, et al., 2005). El cálculo del Índice de Concentración se realiza de una manera similar a como se calcula el coeficiente de Gini con la diferencia que, para el Índice de Concentración, Martín-Vide propone perfeccionar las curvas de Lorenz sustituyendo las curvas poligonales por curvas exponenciales que mejor se ajusten a las series de precipitación trabajadas (Benhamrouche, et al., 2015).

Otros índices para medir la distribución o concentración de la precipitación han sido desarrollados. El grado de concentración de la precipitación, que representa el grado en que la precipitación total del año se concentra en 12 meses y el periodo de concentración de la precipitación que representa el período (mes) en que se concentra la precipitación total del año, son un ejemplo. Estos índices han sido utilizados en Xianjiang, China (Li, et al., 2017) y en Turquía occidental para detectar las concentraciones de precipitación y los patrones espaciales asociados (Yesilirmak, et al., 2016). El principio básico para el cálculo de estos índices es el análisis vectorial ya que, mediante el uso de precipitación vectorizada es posible representar adecuadamente la distribución anual de la precipitación total. Se utiliza información de precipitación mensual, anual o decadal para su cálculo.

Diferentes trabajos han sido realizados con el fin de estudiar la variabilidad espacio - temporal de la concentración de la precipitación utilizando los índices mencionados; Royé y Martín-Vide (2017), realizaron un estudio sobre Estados Unidos con el objetivo de evaluar la importancia de los días con lluvia en la precipitación total anual obteniendo como resultado correlaciones significativas entre el Índice de Concentración con la longitud y elevación. Adicionalmente, los resultados muestran que el 54.7% de la superficie del país, tiene un índice de 0.61 lo cual indica que el 25% de los días más lluviosos, aporta aproximadamente el 70% de la cantidad total de precipitación. Los resultados de este estudio se encuentran en un rango de 0.52 a 0.72, similar a los obtenidos por los mismos autores en otros estudios realizados en Europa. Como conclusión se tienen que el Índice de Concentración da más información de las características de la lluvia que las que se

pueden obtener de la lámina total y de la distribución mensual, particularmente en regiones secas.

En Chile Espinoza y Martín-Vide (2005), realizaron una investigación donde se utilizó la metodología del CI sobre información de 17 estaciones meteorológicas para el periodo 1965 – 2005 cuyos resultados confirman para Chile central y sur una configuración similar a la de la Península Ibérica, con CI altos para climas mediterráneos y valores moderados para climas lluviosos. Sin embargo, para climas desérticos, se da una realidad diferente a la hallada para dichos tipos de climas en Irán y China debido a que la primera clase para el cálculo del índice (0.1 mm a 0.9 mm), acoge más del 50% de los días lluviosos lo que desvirtúa la curva de concentración aproximándola a la recta de equidistribución.

Para China se han utilizado simultáneamente el Índice de Concentración de las Precipitaciones y el Índice de Concentración con el fin de realizar un análisis comparativo de la variabilidad espacio temporal de la precipitación. Se evaluó la tendencia de precipitación anual y del Índice de Concentración mediante el método Mann – Kendall y se obtuvo como resultado que la distribución temporal de la precipitación presenta un comportamiento estacional y bastante heterogéneo (Shi, et al., 2013).

Un trabajo similar fue realizado con información de 35 observatorios meteorológicos en Bangladesh para el periodo de 1971 a 2010. Se estimó la tendencia (con el uso del test Mann – Kendall) y la variabilidad temporal de la precipitación mediante el uso del Índice de Concentración y el Índice de Concentración de las Precipitaciones entre otros. Los resultados indican una distribución muy irregular de las precipitaciones en el sur de la Región Oriental (SER) y una distribución irregular en la mayoría de las otras regiones (Iskander, et al., 2014).

Los investigadores europeos también han realizado esfuerzos para estudiar la concentración de la precipitación diaria. Así, el grupo de Climatología de la Universidad de Barcelona, ha realizado varios estudios sobre la concentración diaria de la precipitación en la Península Ibérica (Martin-Vide, 2004; Benhamrouche, et al., 2011; Benhamrouche, et al., 2012; López, et al., 2010).

Estos autores obtuvieron que el 25 % de los días más lluviosos representa aproximadamente el 75 % del volumen total anual pluviométrico y, además, los altos

valores de la concentración diaria de la precipitación se localizan en la fachada oriental de la Península Ibérica.

Para evaluar los cambios en la concentración de la precipitación en España entre 1946 y 2005, De Luis et al. (2011), utilizaron el Índice de Concentración de la Precipitación y generaron una malla con la información de 2.670 estaciones con una resolución igual a la distancia promedio entre las estaciones meteorológicas. El análisis se realizó para tres escalas temporales diferentes; inicialmente se calculó el Índice de Concentración de precipitación anualmente, después se utilizó la lluvia de cada una de las estaciones características de la región y finalmente se calculó el índice para las temporadas secas y húmedas. Como resultado de esta investigación, De Luis et al. (2011), concluyen que las lluvias suelen ser más irregulares en la región sur y este de España, debido a la influencia del Mediterráneo, mientras que, en el norte, donde tiene influencia el atlántico, las precipitaciones son más distribuidas.

En Italia se realizó un estudio utilizando series de precipitación de 292 estaciones meteorológicas con el fin de identificar un índice capaz de describir la agresividad climática y caracterizar los regímenes de precipitación. Dentro de los índices estudiados, se encuentran el Índice de Fournier y Fournier modificado de los cuales, el Índice Modificado de Fournier, mostró ser el mejor estimador de variabilidad de la precipitación con una correlación alta (0,89) con el resto de índices utilizados (Gregori, et al., 2006).

En Argelia, fue realizado un estudio por Benhamrouche (2015), para el cual se identificaron 3 zonas climáticas en el país después de calcular el Índice de Concentración para 42 series de precipitación para el periodo 1970 - 2008. Así mismo, se han realizado investigaciones de este tipo en el Norte de Gujarat en India (Patel, et al., 2015), en Malasia (Suhaila, et al., 2012). En Calabria, sur de Italia (Coscarelli, et al., 2012), en Nueva Zelanda (Caloiero, 2014), en Venezuela en la región de los Llanos (Lobo, et al., 2010), en el sudeste de Asia (Mandapaka, et al., 2017), en el sudeste de Anatolia (Apaydyn, et al., 2006), entre otros.

Recientemente, fue realizado un estudio a nivel mundial por Monjo y Martin-Vide (2016), donde se analizaron 66,409 series de precipitación evaluando los índices más utilizados para el cálculo de la concentración. Los resultados indican que las altas concentraciones de la precipitación corresponden a zonas con un alto grado de insolación (árido o semiárido). Adicionalmente, se encontró que la correlación entre el número de días lluviosos y los índices de concentración depende de la región analizada. Por ejemplo, las

regiones con precipitaciones irregulares (la cuenca mediterránea y el sudeste de China) presentan mayor concentración de lluvia cuando ocurren menos días lluviosos (correlación negativa). Sin embargo, las regiones con patrones de lluvia regulares (por ejemplo, Brasil e India) muestran una mayor concentración cuando se informan más días lluviosos (correlación positiva). En este estudio se recomienda el uso del Índice de Gini debido a su estimación simple.

Estudios como el de Valdés et al (2016), utilizan los índices mencionados para determinar la agresividad, caracterizada utilizando el Índice Modificado de Fournier y la concentración de la precipitación, a través del índice propuesto por Oliver (1980), en términos de los efectos erosivos que esta produce en el suelo. En este estudio, por ejemplo, los autores encontraron que para la zona de estudio (costa suroeste de América del Sur) la precipitación era un poco más estacional en los últimos 50 años.

La capacidad erosiva de la lluvia ha sido estudiada en algunos lugares de Colombia utilizando el Índice de Fournier modificado. Guio-Martínez (2015), realizó una investigación sobre dicho tema y generó algunos mapas de erosión de la lluvia para la cuenca del embalse de La Copa en Boyacá. Adicionalmente, concluyó que la zona de estudio presenta bajo riesgo de erosión por lluvias y que estas se presentaban de una manera distribuida en el tiempo.

En la región cafetera de Quindío, Lince & Castro (2015), desarrollaron una investigación similar utilizando datos de precipitación provenientes de 19 estaciones meteorológicas. Como resultado de dicha investigación, presentaron un mapa en el que se muestra la distribución espacial de la erosividad cuyos valores fueron clasificados entre altos y muy altos. También encontraron que la concentración de la lluvia, utilizando el Índice de Concentración de la Precipitación, podría definirse como uniforme y moderadamente estacional.

2. Datos

Como base para el desarrollo del siguiente estudio, se utilizó información de precipitación diaria procedente de las estaciones meteorológicas del IDEAM. Adicionalmente, se utiliza información satelital de precipitación diaria proveniente de la base de datos CHIRPS v2.0.

2.1 IDEAM

En este estudio se utilizó la información de precipitación registrada en las estaciones del IDEAM. La información utilizada posee una resolución temporal diaria y espacialmente presenta mayor densidad en la zona noroccidental del país (Urrea, et al., 2017). En total se recopilieron 2716 estaciones, de las cuales se descartaron 1115 por tener un porcentaje de datos faltantes mayor al 20% del total de los datos registrados. Se seleccionó un total de 1596 estaciones con información de precipitación para el periodo 1981-2016 con el fin de efectuar comparaciones con los datos obtenidos al utilizar la información de CHIRPS v2.0.

2.2 CHIRPS v2.0.

Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) es una base de datos de precipitación disponible al público desde 2014 creada y administrada por el U.S. Geological Survey (USGS) y University of California, Santa Bárbara (UCSB). Contiene información desde 1981 hasta el presente y una extensión espacial, con datos únicamente en las zonas terrestres, comprendida entre las latitudes 50S y 50N y en todas las longitudes con una resolución de 0.05°. Las resoluciones temporales son días, pentadas, meses, décadas y años. Para este estudio se utilizó la información diaria. Las fuentes de datos a partir de las cuales fue creada CHIRPS son: (1) Climate Hazards Precipitation Climatology (CHPClim); (2) Infrarrojo (IR) térmico geoestacionario; (3) Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM); (4) Modelo atmosférico de campos de precipitación del sistema de predicción climático de la NOAA (CFSv2); y (5) Observaciones in situ de precipitación

obtenidas de varias fuentes incluidos servicios meteorológicos estadounidenses y regionales (Funk, et al., 2015).

3. Metodología

Como metodología para el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la concentración de la precipitación en Colombia, se calculan los índices de Fournier, Fournier Modificado, Concentración, Concentración de la precipitación y el Índice de Gini; Se trabaja con una ventana móvil de 365 días con desplazamientos de un día. Para cada serie de 365 datos se calculan los índices mencionados generando series de estos índices en el tiempo, utilizadas para detectar posibles ciclos en la concentración de la precipitación.

3.1 Índice de Fournier

El Índice de Fournier (IF) planteado por Fournier (1960), estima la capacidad erosiva (agresividad) de las precipitaciones basado en el mes más lluvioso de cada año para un periodo dado de tiempo y está definido por la ecuación (3-1). Este índice no involucra los factores físicos presentes en el proceso de erosión (Valdés, et al., 2016). Según los valores que se obtengan del índice, la precipitación puede ser clasificada como de agresividad muy baja hasta agresividad muy alta. Los valores para la clasificación del Índice de Fournier se presentan en la Tabla 3-1.

$$IF_j = \frac{P_{maxj}^2}{P_m} \quad (3-1)$$

Donde:

IF_j : Índice de Fournier para el año j (mm).

P_{maxj} : Precipitación del mes más lluvioso del año j (mm).

P_m : Precipitación anual (mm).

Tabla 3-1: Clasificación del Índice de Fournier (IF).

IF	Clasificación
<=15	Muy bajo
16 – 30	Bajo
31 – 50	Moderado
51 – 65	Alto
>65	Muy Alto

3.2 Índice Modificado de Fournier

El Índice de Fournier Modificado (IMF) fue propuesto por Arnoldus (1980). Es una corrección del Índice de Fournier (IF), que solo consideraba la precipitación del mes más húmedo del año. Arnoldus propone que sea tomada en cuenta la precipitación de todos los meses del año para caracterizar la agresividad de la precipitación.

Al igual que el Índice de Fournier, para el Índice Modificado, las precipitaciones tienen clasificaciones que van entre agresividades muy bajas a agresividades muy altas. Los valores para realizar dicha clasificación se presentan en la Tabla 3-2. El Índice se estima a partir de la ecuación (3-2).

$$IMF_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_m} \quad (3-2)$$

Donde:

IMF_j: Índice Modificado de Fournier para el año j (mm).

P_{ij}: Precipitación para el mes i del año j (mm).

P_m: Precipitación anual (mm).

Tabla 3-2: Clasificación del Índice Modificado de Fournier (IMF).

IMF	Clasificación
<60	Muy bajo
61 – 90	Bajo
91 – 120	Moderado
121 – 160	Alto
>161	Muy Alto

3.3 Índice de Concentración de la Precipitación

El valor del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) propuesto por Oliver (1980), es un indicador de la distribución temporal de la precipitación. Este índice proporciona información sobre si la precipitación anual se concentra en un solo mes o si está igualmente distribuida a lo largo de todo el año (Valdés, et al., 2016). Los valores del ICP se expresan en porcentaje que varían entre 8.3% para precipitación uniforme hasta 100% para precipitación concentrada en un solo mes del año. El ICP es calculado con la ecuación (3-3) Los valores para la clasificación del ICP se presentan en la Tabla 3-3.

$$ICP_j = \frac{100 * \sum_1^{12} (P_{ij})^2}{P_m^2} \quad (3-3)$$

Donde:

ICP_j: Índice de Concentración de la Precipitación para el año j.

P_{ij}: Precipitación para el mes i del año j (mm).

P_m: Precipitación anual (mm).

Tabla 3-3: Clasificación del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP).

ICP	Clasificación
8.3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Fuertemente estacional
50 - 100	Aislada

3.4 Índice de Gini

El Índice de Gini es usado habitualmente para establecer y evaluar la desigualdad en la distribución del ingreso económico de las personas en los países, o bien, otra variable cuya distribución no sea uniforme, como la precipitación. El Índice de Gini es un número entre 0 y 1, en donde 0 corresponde con la perfecta igualdad (todos los días presentan eventos de lluvia) y donde el valor 1 se corresponde con la perfecta desigualdad (en un solo día llueve el total de la precipitación registrada para el periodo de estudio).

El coeficiente de Gini se calcula como una proporción de las áreas en el diagrama de la curva de Lorenz (Figura 3.1). Si el área entre la línea de equidistribución y la curva de Lorenz es a , y el área por debajo de la curva de Lorenz es b , entonces el coeficiente de Gini será:

$$Gini = \frac{a}{a + b} \quad (3-4)$$

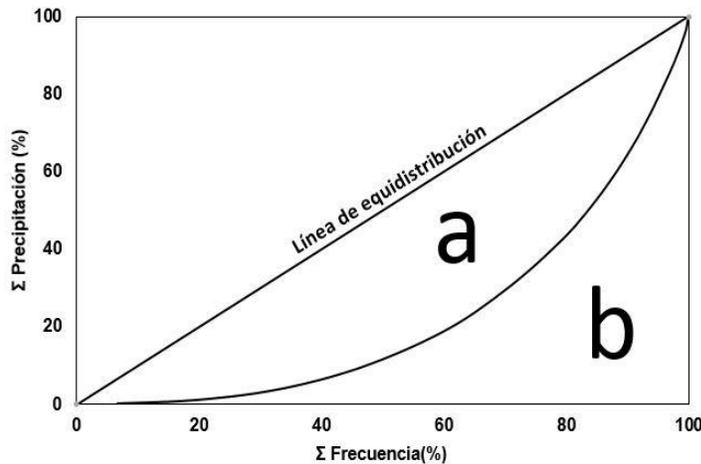


Figura 3.1 Curva de Lorenz.

El Índice de Gini puede ser calculado también con la ecuación (3-5) (Medina, 2001):

$$IG = \left| 1 - \sum_{i=1}^{n-1} (X_{i+1} - X_i)(Y_{i+1} + Y_i) \right| \quad (3-5)$$

Donde:

IG: Índice de Gini.

n: Cantidad de valores únicos de la serie de precipitación.

X: Frecuencia relativa acumulada.

Y: Precipitación relativa acumulada.

3.5 Índice de Concentración

Basado en la metodología de cálculo del Índice de Gini, Martín-Vide (2004), formuló el Índice de Concentración (IC) para el estudio de la precipitación diaria del litoral mediterráneo español. La diferencia entre el coeficiente de Gini y el Índice de Concentración radica en el uso de la siguiente ecuación para el cálculo de la precipitación relativa acumulada:

$$Y = aXe^{bX} \quad (3-6)$$

Donde:

a, b: Constantes.

X: Frecuencia relativa acumulada.

Y: Precipitación relativa acumulada.

La expresión para el Índice de concentración, en términos de la expresión presentada anteriormente, es la que sigue a continuación. Una vez determinadas las constantes (a, b), la integral definida de la curva exponencial entre 0 y 100 muestra la superficie comprendida entre la curva, el eje de abscisas y la ordenada 100.

$$IC = \frac{5000 - \left[\frac{a}{b} e^{bx} \left(X - \frac{1}{b} \right) \right]_0^{100}}{5000} \quad (3-7)$$

Donde:

IC: Índice de Concentración.

a, b: Constantes determinadas mediante mínimos cuadrados.

X: Frecuencia absoluta acumulada.

3.6 Tendencias a largo plazo

Las tendencias temporales de los índices para el periodo de registro de cada estación de medición de precipitación, son evaluadas utilizando la prueba estadística no paramétrica Mann-Kendall, esta prueba se deriva de una prueba de correlación de rango para dos grupos de observaciones considerando la correlación entre el orden del rango de los valores observados y su orden en el tiempo (Carmona, et al., 2014).

El primer paso para aplicar la prueba Mann-Kendall es la estimación del estadístico S, como sigue:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (3-8)$$

Donde:

$$\text{sign}(x_j - x_k) \begin{cases} 1 \text{ cuando } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 \text{ cuando } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 \text{ cuando } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

La hipótesis nula de la prueba de Mann Kendall afirma que los datos de una serie de tiempo son independientes e idénticamente distribuidos. Sin embargo, bajo la existencia de una autocorrelación positiva en los datos, incrementa la posibilidad de detectar tendencias cuando realmente no existen y viceversa. Por este motivo Hamed y Ramachandra (1998), proponen una nueva metodología para el cálculo de la varianza de Mann Kendall para datos autocorrelacionados:

$$V(S) = \left(\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \right) \left(\frac{n}{n^*} \right) \quad (3-9)$$

Con:

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)\rho_s i \quad (3-10)$$

Donde n es el número de observaciones y ρ denota la función de autocorrelación de los valores observados. Luego, se estima una estadística de prueba estandarizada Z.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[V(S)]^{\frac{1}{2}}} \text{ si } S > 0 \\ 0 \text{ si } S = 0 \\ \frac{S+1}{[V(S)]^{\frac{1}{2}}} \text{ si } S < 0 \end{cases}$$

Para el nivel de confianza del 95%, la hipótesis nula de ausencia de tendencia se rechaza si $|Z| > 1.96$. En el nivel de confianza del 90%, la hipótesis nula de ausencia de tendencia se rechaza si $|Z| > 1.64$.

La prueba Sen fue utilizada para cuantificar el cambio en la magnitud por unidad de tiempo en las tendencias de las series de índices. Esta metodología requiere datos igualmente

espaciados y no hace suposiciones sobre sus estadísticas de distribución (Sen, 1968). La pendiente se estima como:

$$m = \frac{X_{i+1} - X_i}{i + 1 - i} \quad (3-11)$$

Donde m es la pendiente local entre los datos consecutivos X_{i+1} y X_i . La pendiente general de la serie estudiada resulta de la mediana de todo el conjunto de pendientes locales (Sen, 1968).

3.7 Correlación

Con el fin de determinar el grado de relación entre los índices y algunas variables pluviométricas y geográficas, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman utilizando la expresión que se muestra a continuación:

$$\rho = \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (3-12)$$

Donde:

D: Diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden m .

N: Número de parejas de datos.

El valor de p es utilizado para evaluar el nivel para el cual las correlaciones de Spearman entre los índices y las variables geográficas y pluviométricas son significativas a un nivel de confianza del 90% y el 95%.

En el análisis de los resultados obtenidos para la concentración de la precipitación, se utiliza la división por regiones naturales propuesta por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para determinar patrones espaciales.

4. Resultados

4.1 Generalidades

Las 1596 estaciones de precipitación empleadas en esta investigación se encuentran repartidas dentro del país de una forma poco homogénea. El 65% de las estaciones, correspondiente a 1039 puntos, se localizan sobre la región Andina. La región Caribe es la segunda zona con mayor presencia de estaciones de medición de precipitación con el 21% del total (340 estaciones). Las regiones Amazonía, Orinoquía y Pacífico cuentan con un número bajo de estaciones en comparación con las regiones Andina y Caribe. Se tienen 72, 84 y 61 puntos de medición respectivamente para estas regiones, sin embargo, las series de precipitación analizadas constituyen una muestra representativa de la orografía y diversidad geográfica presente en el territorio colombiano.

La distribución espacial y la precipitación media anual de las estaciones de precipitación del IDEAM utilizadas en este estudio pueden observarse en la Figura 4.1.

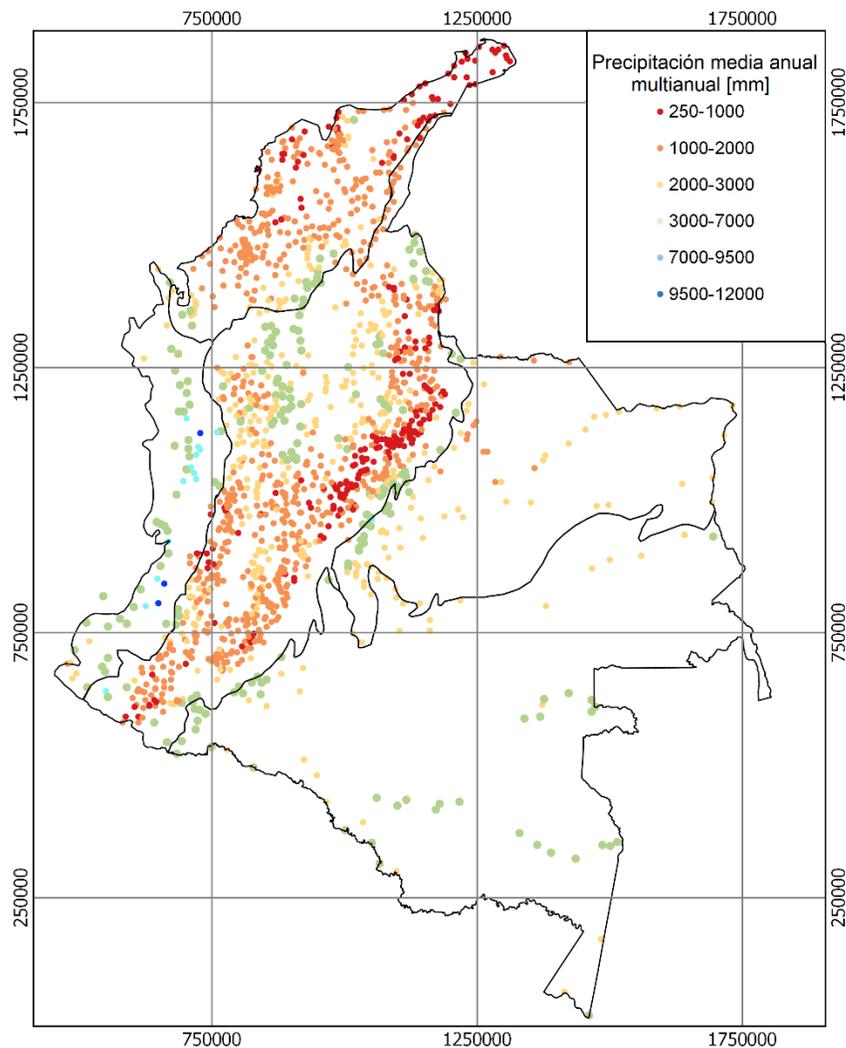


Figura 4.1: Distribución espacial de las estaciones de precipitación utilizadas.

Sobre la región Pacífico, se presenta la precipitación media anual más alta, con totales que alcanzan los 11800 mm. Entre el 40% y el 60% de las estaciones estudiadas tienen una precipitación media anual que varía entre 1600 mm y 2600 mm. En la región Caribe, sobre la península de La Guajira y sobre el altiplano cundiboyacense, tiene lugar la precipitación media anual más baja con láminas entre 250 mm y 845 mm. La Figura 4.2 muestra el histograma de frecuencias para las precipitaciones medias anuales en el territorio colombiano.

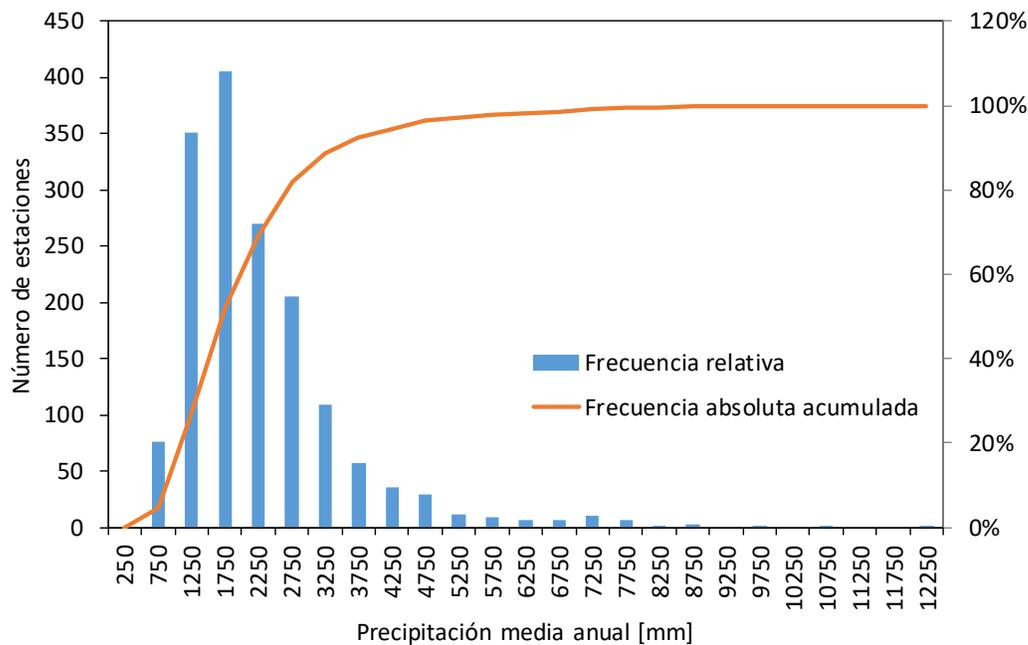


Figura 4.2: Histograma de frecuencias de la precipitación media anual.

4.2 Distribución espacial de la concentración de la precipitación

En este apartado se analiza el comportamiento espacial de la concentración de la precipitación en Colombia según los resultados del IG, IC, ICP, IF e IMF. La detección de patrones espaciales para los índices propuestos, se basa en un análisis visual sobre las figuras que se presentan en cada uno de los siguientes subcapítulos.

El IG y el IC son calculados utilizando el registro completo de información de precipitación diaria que posee cada estación obteniendo índices que para este estudio son llamados como de largo plazo (un solo índice como resultado del registro total de precipitación). Para los demás índices (ICP, IF e IMF), dado que su metodología de cálculo utiliza información de precipitación mensual para calcular un índice anual, se calcula un índice por cada año del periodo de registro de las estaciones y se utiliza para el análisis, el promedio de los índices calculados para cada sitio.

4.2.1 Distribución espacial del Índice de Gini con datos del IDEAM

La Figura 4.3 presenta la distribución espacial del valor del Índice de Gini mediante puntos de color para las estaciones de precipitación estudiadas.

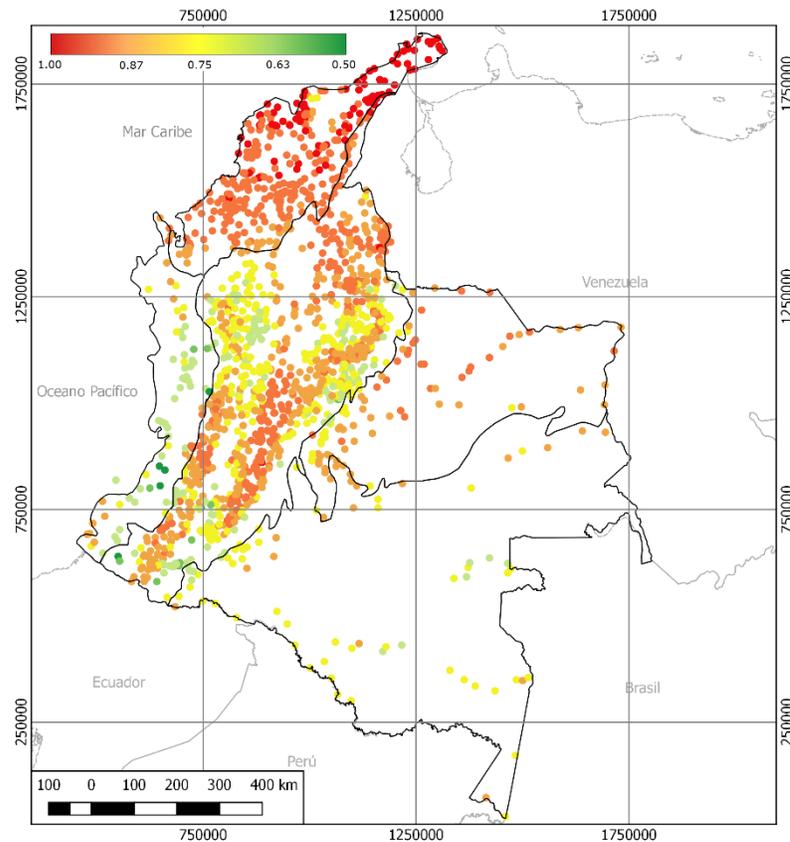


Figura 4.3: Índice de Gini largo plazo con información IDEAM.

En esta figura se puede observar claramente, que la mayor concentración de la precipitación, representada por el color rojo, se presenta en la zona norte del país donde gran parte de la lluvia cae en unos pocos días. Por ejemplo, en la estación Jasay ubicada en la península de La Guajira, el índice de Gini tiene un valor de 0.98 lo que indica que, el 3% de los días del periodo estudiado, aporta el 97% del total pluviométrico (el 97% de los días que quedan representa el 3% de la precipitación). Gracias a la metodología de cálculo del IG, es posible conocer la cantidad de precipitación que aportan diferentes porcentajes de tiempo. Gráficamente, estos porcentajes pueden ser obtenidos de la curva de Lorenz asociada a cada valor del índice.

Los puntos verdes, que indican una distribución más uniforme de la precipitación, se encuentran en el occidente y suroccidente del país. En este caso, por ejemplo, para la estación Junín, localizada en el nudo de los pastos, se presenta el caso que el 10% de los días lluviosos aporta el 33% del total de la precipitación y el 50% de los días lluviosos aporta el 85% del total de la precipitación.

La Figura 4.4 muestra la curva de Lorenz asociada al Índice de Gini obtenido para la estación Jasay que presenta el valor del IG más alto (0.98) del país y se encuentra ubicada en la región Caribe ; y para la estación Junín, ubicada en el municipio de Barbacoas en Nariño la cual presenta un IG de 0.50. Con los resultados presentados en dicha figura, se puede comprobar que los índices bajos están relacionados con precipitaciones más distribuidas en el tiempo, ya que la curva se acerca más a la línea de equidistribución, mientras que índices muy altos, representan una acumulación de la precipitación en pocos días.

Las curvas de Lorenz mostradas en la Figura 4.4 no tienen su inicio en el punto 0,0, como si lo hacen curvas mostradas en diferentes fuentes consultadas. Esto se debe a que, para este estudio en particular, se decidió considerar dentro del cálculo del IG los días para los cuales la precipitación es igual a cero. Entre más desplazado hacia la derecha este el punto de inicio de la curva de Lorenz, mayor es la cantidad de días sin precipitación que presenta la zona estudiada.

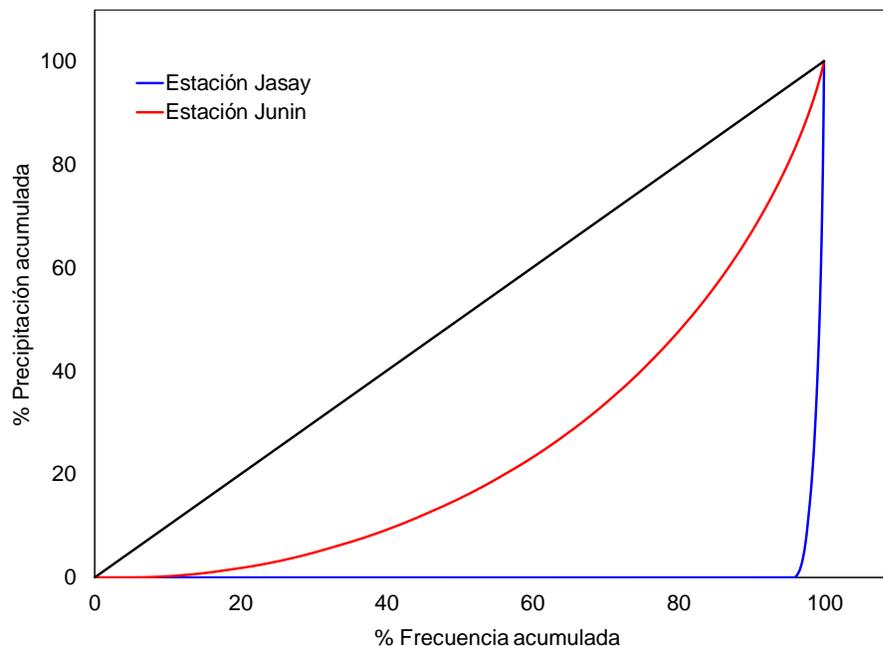


Figura 4.4: Curva de Lorenz para las estaciones Junín y Jasay.

La variación por regiones naturales del Índice de Gini se muestra en la Figura 4.5. Para la región Andina, los valores del Índice de Gini oscilan desde 0.50 hasta 0.97, en la región Amazonia los valores van de 0.71 a 0.94, para la región Caribe se presentan índices de Gini entre 0.68 y 0.98, en la región Orinoquía van desde 0.79 hasta 0.95 y finalmente, para la región Pacífico se encuentran índices de Gini que van desde 0.49 hasta 0.90. En esta figura, se puede observar que el rango intercuartil es más amplio en la región Pacífico lo que indica una distribución más dispersa en torno a los valores del índice para esta región y los rangos más pequeños se presentan en las regiones Amazonía y Caribe mostrando para estas zonas un comportamiento más homogéneo respecto a la concentración de la precipitación. Es posible también apreciar que la región Caribe presenta la mayor cantidad de valores por fuera del límite inferior lo que indica que, aunque en esta región el comportamiento de la concentración se muestra homogéneo y el IG se concentra alrededor de un mismo valor. Existen sitios dentro de la región que presentan valores atípicos a este comportamiento y para los cuales, la concentración de la precipitación disminuye, es decir, la lluvia total se distribuye en un mayor número de días.

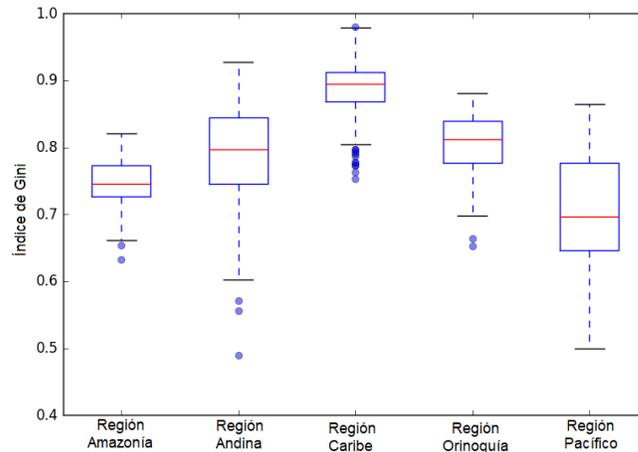


Figura 4.5: Distribución por regiones del Índice de Gini para datos IDEAM.

4.2.2 Distribución espacial del Índice de Gini con datos CHIRPS v2.0.

Los valores para el Índice de Gini obtenidos al utilizar la información de la base de datos CHIRPS v2.0. para un periodo de estudio comprendido desde 1981 hasta 2016, se presentan en la Figura 4.6. En esta imagen es posible identificar 4 zonas con comportamientos diferentes; la primera, localizada en la Península de La Guajira, presenta los valores del Índice de Gini más altos, lo cual indica que es en esta zona donde las precipitaciones diarias son más concentradas. Los valores de Índice de Gini para la misma son mayores a 0.90 lo que indica que el 80% del total de la lluvia cae en el 10% de los días lluviosos. Como se explicó anteriormente, cada valor del IG tiene asociada una distribución de la precipitación en el tiempo, de esta manera, es posible saber qué porcentaje de lluvia es aportado por cada porcentaje de tiempo.

La segunda zona se ubica sobre la parte norte de las regiones Andina y Pacífico entre el sector nororiental de la cordillera occidental, el sector sur de las estribaciones occidentales de la cordillera occidental, los valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan y el límite entre la montaña antioqueña y el Magdalena medio. En esta zona se presentan los valores más bajos registrados en este estudio para el Índice de Gini. Los valores encontrados van desde 0.57 hasta 0.64. Según esto, el 10% del total de días con precipitación aporta el 40% de la precipitación total.

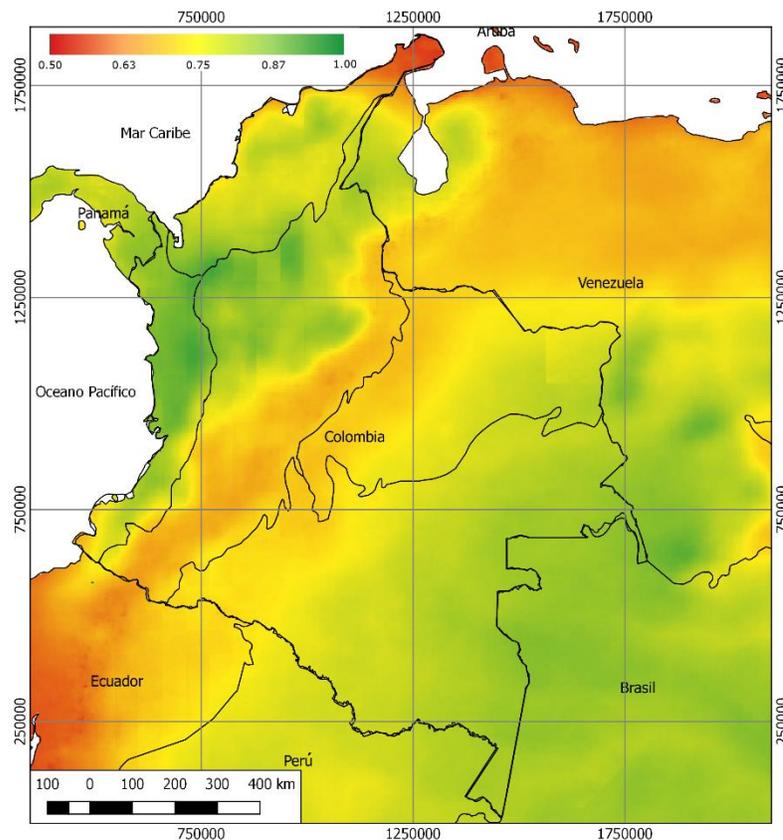


Figura 4.6: Índice de Gini largo plazo con información CHIRPS v2.0.

Desde el Macizo Colombiano, extendiéndose por el nudo de los pastos, la vertiente amazónica y llanera de la cordillera oriental, el macizo volcánico, el alto Magdalena y el altiplano cundiboyacense, se desarrolla la tercera zona diferenciada. En esta zona, el valor del Índice de Gini varía de 0.77 a 0.83. Para este intervalo de valores, entre el 81% y el 89% del total de la precipitación se presenta en el 20% de los días lluviosos. Algunas zonas de la costa atlántica del país (límite entre la sierra nevada de Santa Marta y la península de La Guajira y delta del río Magdalena), y de la costa pacífica suroccidental (llanuras costeras), muestran valores del Índice de Gini similares a los presentados en esta tercera zona.

La cuarta y última zona se localiza en la parte suroriental del país sobre las regiones de la Amazonía y la Orinoquía. En este espacio es posible encontrar valores de Índice de Gini que se encuentran en el rango de 0.64 y 0.76 lo que indica que alrededor del 20% y el 40% de la precipitación total se da en el 20% de los días lluviosos.

En general, es posible apreciar que la concentración de la precipitación diaria en Colombia para una escala temporal de largo plazo en el periodo 1981 – 2016, aumenta desde el oriente al occidente del país hasta llegar al piedemonte llanero, la serranía de La Macarena y el piedemonte amazónico donde se tiene una concentración alta, pasa de 0.66 al oriente a 0.81 en las zonas mencionadas; así mismo, la concentración aumenta hacia el norte donde se presentan los valores más elevados (0.98 en la península de La Guajira). En la costa pacífica, en el departamento de Chocó y en parte del departamento de Antioquia se presentan las distribuciones de precipitación más uniformes dentro del país.

Respecto a los valores obtenidos con la información de las estaciones meteorológicas del IDEAM y los resultados para la información de la base de datos CHIRPS v2.0, es posible observar que los índices se muestran muy similares, así como la distribución espacial de la concentración de la precipitación acorde a las zonas.

Sin embargo, se observan algunas diferencias en el IG calculado para la parte baja de la región Caribe que presenta mayor concentración en la precipitación cuando su cálculo se hace utilizando la información del IDEAM. Esto puede ser explicado por los errores significativos en la representación de la precipitación igual a cero que posee CHIRPS (Urrea, et al., 2017) debido a su resolución espacial. Las estaciones de precipitación del IDEAM pueden captar mejor periodos puntuales de precipitación cero. Aun así, el cálculo de la concentración de la precipitación diaria utilizando la base de datos CHIRPS presenta, entre otras, la ventaja de no tener datos faltantes en sus registros.

4.2.3 Distribución espacial del IF, IMF, ICP e IC con datos del IDEAM

Con el fin de profundizar en el estudio de la variación espacial de la concentración de la precipitación en Colombia, se utilizaron datos de precipitación mensual (total de precipitación por mes) para el cálculo de los Índices de Fournier, Modificado de Fournier, Índice de Concentración de la Precipitación e información de precipitación diaria para el cálculo del Índice de Concentración. Los primeros dos, fueron desarrollados con el fin de conocer la agresividad de las precipitaciones o el efecto erosivo de estas sobre el suelo; el tercer índice refleja la estacionalidad de las lluvias, es utilizado para detectar grandes diferencias existentes en las temporadas secas y lluviosas. El cuarto índice, tiene el mismo fundamento del Índice de Gini con variaciones en el cálculo de las curvas de concentración.

- Índice de Fournier (IF)

El Índice de Fournier, calculado para las series de precipitación de las estaciones meteorológicas del IDEAM, presenta valores que van desde 23 mm hasta 228 mm, lo que, según la clasificación, indica que las lluvias en el territorio colombiano son de agresividades que van de baja a muy alta (ver Figura 4.8).

De las 1596 series de precipitación estudiadas, 791 se clasifican con agresividad muy alta y 344 con agresividad alta, lo que representa el 71% del total de puntos de medición de precipitación estudiados. El valor más alto del Índice de Fournier es de 228 mm y se da en la depresión Momposina cerca a la ciénaga Iguana. El régimen de lluvias en esta zona es unimodal y las lluvias se concentran entre los meses de abril y noviembre.

El IF calculado para la región Pacífico muestra las características de una distribución normal (Figura 4.7) y posee el rango intercuartil más amplio de todas las regiones, sin embargo, los sitios estudiados en esta región, a pesar de tener una mayor variación en el IF, se mantienen dentro de la clasificación de agresividad muy alta.

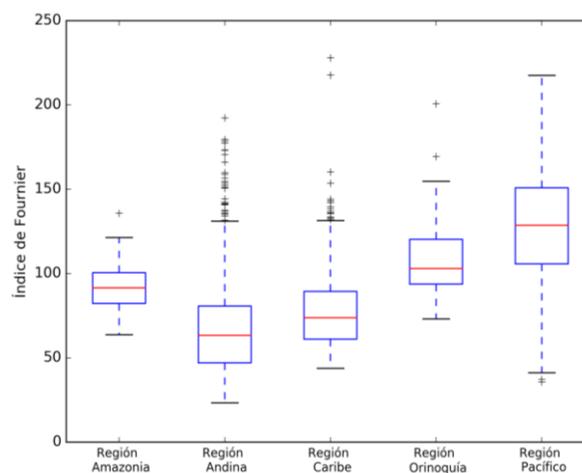


Figura 4.7: Diagrama de caja por regiones para el Índice de Fournier.

Las demás regiones presentan valores más homogéneos con un sesgo positivo para las regiones Andina, Caribe y Orinoquía lo que implica una mayor dispersión de los puntos estudiados hacia los valores más altos, es decir, precipitaciones de agresividad más alta. El Índice de Fournier calculado para la región Amazonia, muestra también características de una distribución normal, pero con valores más cercanos entre ellos, es decir, se presenta menos dispersión en los resultados del IF para esta región.

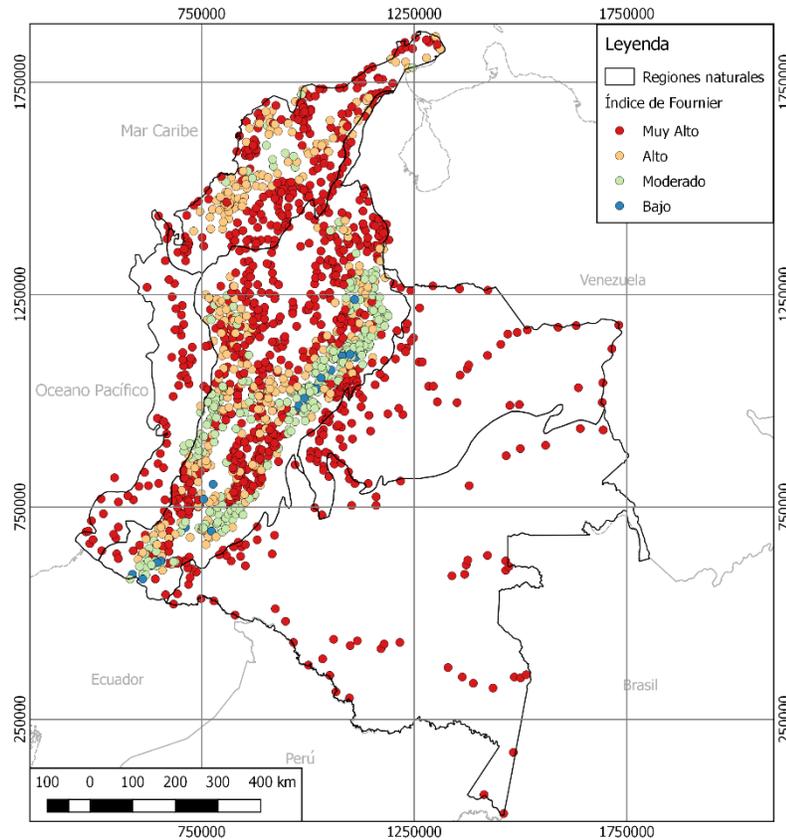


Figura 4.8: Índice de Fournier con información IDEAM.

Sobre la región Andina, en el valle del Cauca, el alto Magdalena, el macizo volcánico, el altiplano cundiboyacense, la vertiente llanera de la cordillera oriental y parte de la montaña santandereana, (Figura 4.8), se localiza una amplia zona para la cual, los valores del Índice de Fournier, indican que la agresividad de las precipitaciones puede clasificarse como baja y moderada. En la región Caribe es posible encontrar también algunos puntos con precipitaciones de agresividad moderada sobre las sabanas del Caribe.

El valor más bajo para el Índice de Fournier se presenta en el altiplano cundiboyacense, a una altura aproximada de 2640 m.s.n.m., en esta zona la precipitación media anual es de 647 mm. El régimen de precipitación en este punto es bimodal con dos temporadas de lluvia que se presentan durante los meses de marzo, abril, mayo y principios de junio, y una segunda temporada que va desde finales de septiembre hasta principios de diciembre.

- Índice Modificado de Fournier (IMF)

El comportamiento espacial del índice Modificado de Fournier, que se presenta en la Figura 4.10, es similar al mostrado en el Índice de Fournier. Se exhibe una gran cantidad de valores altos para el índice, lo que indica que la agresividad de las precipitaciones es clasificada como muy alta. Se encuentra como diferencia, que la cantidad de estaciones con clasificación baja o moderada en la agresividad de las precipitaciones disminuye de un índice a otro. Esto puede ser debido a la diferencia que se presenta entre la metodología para el cálculo de los dos índices, ya que el Índice de Fournier solamente considera el mes más lluvioso del año para obtener su valor, mientras que el Índice Modificado de Fournier considera la precipitación de todos los meses del año ajustándose mejor a aquellas regiones donde se presenta un régimen de precipitación bimodal o en zonas donde se presente más de un mes con precipitaciones altas.

Las series de precipitación con agresividades de clasificación alta y muy alta representan el 90% del total de las estaciones de medición de precipitación estudiadas. Un aumento del 20% respecto a las series de precipitación que mostraban una clasificación similar para el Índice de Fournier. Los puntos con lluvias de agresividad baja y moderada pasaron de ser 310 a ser 153.

La Figura 4.9 muestra la distribución del IMF por regiones naturales. Esta figura muestra que todas las regiones tienen un sesgo positivo con valores atípicos por encima del límite superior, corroborando lo que se mencionaba anteriormente sobre el aumento en el número de sitios clasificados con precipitaciones de agresividad alta y muy alta al utilizar este índice. La región Andina presenta la mayor cantidad de valores atípicos para los dos índices, esto puede ser explicado si se tiene en cuenta el tamaño de esta región y la diversidad que presentan las precipitaciones dentro de la misma.

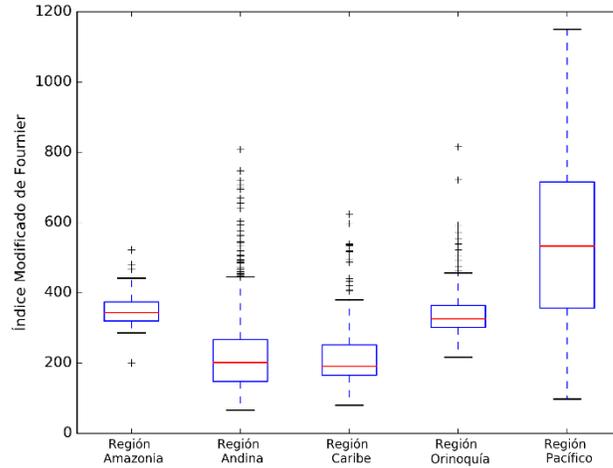


Figura 4.9: Diagrama de caja por regiones para el Índice Modificado de Fournier.

La estación de precipitación con el mayor Índice Modificado de Fournier se localiza en las llanuras costeras del Pacífico donde el valor del índice es de 1149 mm. La precipitación promedio anual en esta estación es de 11829 mm.

El valor más bajo del índice, lo que representa una agresividad baja de las precipitaciones, conserva su localización en el altiplano cundiboyacense, tal como sucede con el Índice de Fournier, pero para el índice modificado se presenta en una zona donde la precipitación promedio anual es de 509 mm. El valor del índice allí es de 66 mm. De los 33 sitios que presentan lluvias con clasificación de agresividad baja, 29 se localizan en la región Andina, los cuatro restantes, se localizan en la región Caribe en la península de La Guajira donde la precipitación media anual no supera los 350 mm.

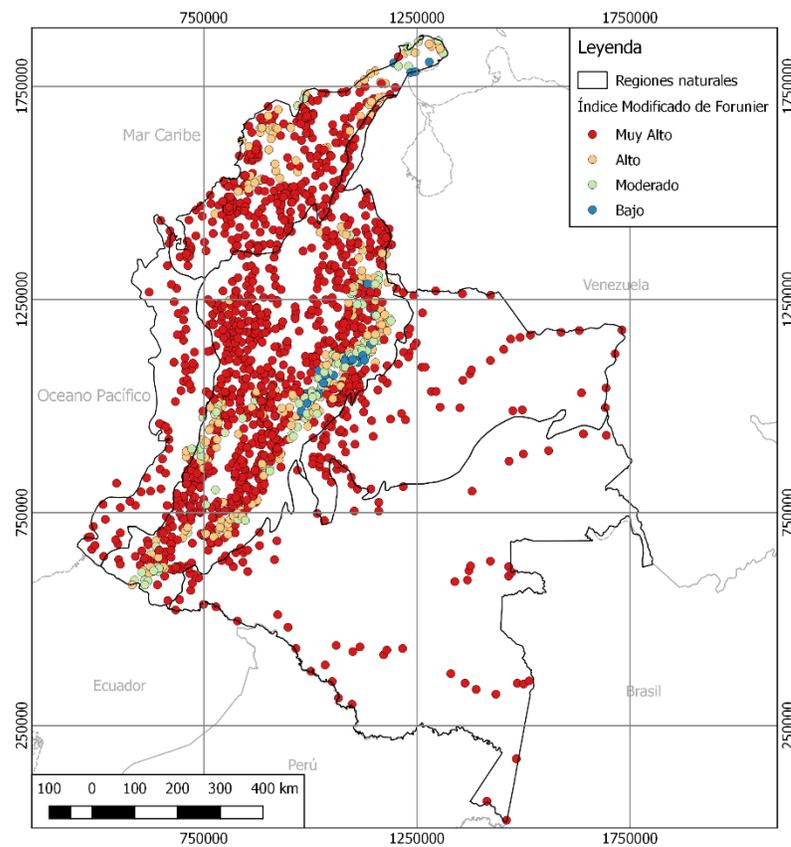


Figura 4.10: Índice Modificado de Fournier con información IDEAM.

- Índice de Concentración de la Precipitación (ICP)

El Índice de Concentración de la Precipitación (Figura 4.12), muestra que en el territorio colombiano predominan las precipitaciones estacionales moderadas principalmente sobre la región Andina, lo cual puede ser explicado por el régimen bimodal de precipitación con temporadas secas y húmedas que se presentan en esta zona. El 72% de las series estudiadas muestra este comportamiento lo que corresponde a un total de 1151 series de precipitación de las cuales 880 (76%), están localizadas sobre dicha región.

La estacionalidad de las precipitaciones aumenta a medida que aumenta la latitud. En la región Caribe, existen 59 estaciones meteorológicas para las cuales, según el Índice de Concentración de la Precipitación, las precipitaciones tienen un comportamiento fuertemente estacional con una diferencia apreciable entre los periodos de lluvia y los periodos secos (Figura 4.11).

El 23% del total de series de precipitación estudiadas, reflejan lluvias de carácter estacional y se encuentran localizadas principalmente sobre las regiones Andina y Caribe.

Las lluvias con comportamiento uniforme representan el 1% del total estudiado y se ubican en las regiones Pacífico en los valles aluviales de los ríos Atrato y San Jorge, y Andina sobre la cordillera central meridional.

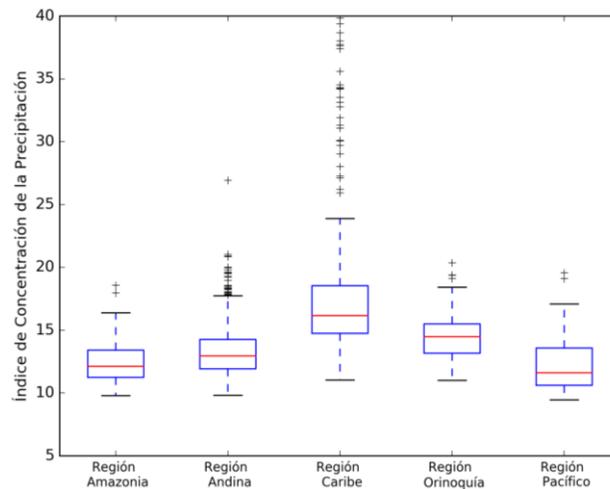


Figura 4.11: Diagrama de caja por regiones para el Índice de Concentración de la precipitación.

El valor más bajo del Índice de Concentración de la Precipitación se da en el municipio de Río Quito en el departamento de Chocó y es de 9.45%. La precipitación media anual en este municipio es de 6808 mm. En este lugar, situado en la parte media de la cuenca del río Atrato, la distribución temporal de las lluvias es de tipo unimodal donde se presenta un ligero descenso de la precipitación en los meses de febrero y marzo. El valor máximo se registra en el mes de abril y el mínimo en el mes de febrero. Con referencia a concentración de la precipitación, en este municipio se tiene que los meses lluviosos aportan cerca de un 85% del total de precipitación anual.

El máximo valor registrado para el Índice de Concentración se encuentra en el municipio de Uribia, departamento de la Guajira, para el que la precipitación promedio anual es de 319 mm. El régimen de precipitaciones es de tipo bimodal: períodos secos durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (menos de 100 mm/mes) y julio y agosto; y períodos lluviosos en los meses de abril, mayo y junio; septiembre, octubre y noviembre (200-300 mm/mes).

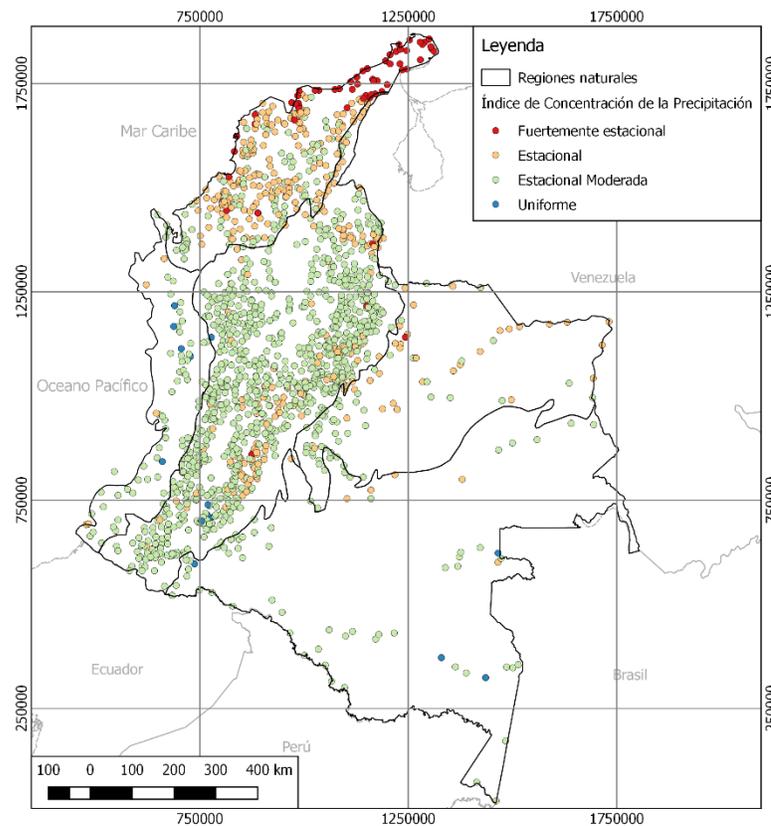


Figura 4.12: Índice de Concentración de la Precipitación con información IDEAM.

- Índice de Concentración (IC)

Respecto al Índice de Gini, el Índice de Concentración muestra una mayor cantidad de estaciones meteorológicas para las que las precipitaciones tienen una alta concentración en la región Caribe sobre los valles de los ríos Sinú y Alto San Jorge. También se observan valores más altos del Índice de Concentración (0.68 frente a 0.73) para algunas zonas de la región Pacífico.

El valor más alto para el Índice de Concentración se encuentra sobre la península de La Guajira, para la estación Santana Urraich ubicada a 30 m.s.n.m. y para la cual la precipitación media anual es de 416 mm. Por otro lado, el menor Índice de Concentración calculado, se ubica en la estación Pto. López en las llanuras costeras del Pacífico. La precipitación media anual de esta zona es del orden de 11829 mm.

La variación del Índice de Concentración para las diferentes regiones naturales se da de la siguiente manera; para la región Caribe, el IC va desde 0.73 hasta 0.98. En la región Andina se encuentran valores de 0.53 a 0.94 mientras que en la región Amazonía lo valores están entre 0.69 y 0.84. Para la región Pacífico y la región Orinoquia, los índices varían de 0.50 a 0.87 y 0.63 a 0.89 respectivamente. La Figura 4.13 indica que la concentración de la precipitación se muestra más homogénea en regiones como Amazonía y Caribe, donde el IC tiene un rango intercuartil más reducido. La región Andina presenta un sesgo negativo lo que implica que el comportamiento de la concentración muestra una tendencia hacia los valores bajos. La región Pacífico tiene la mayor dispersión en el Índice de Concentración respecto a las demás regiones.

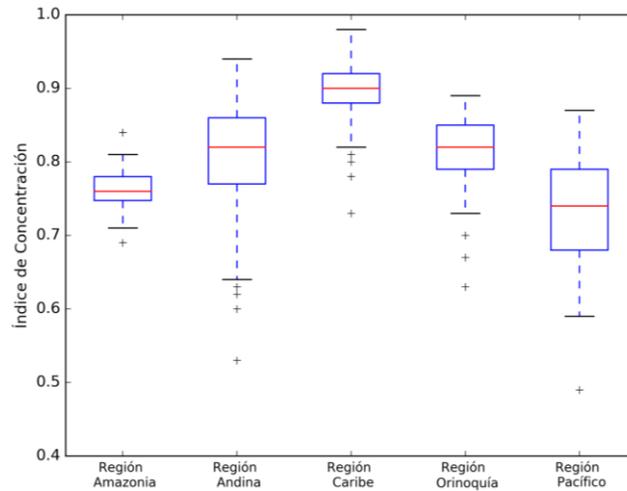


Figura 4.13: Diagrama de caja por regiones para el Índice de Concentración.

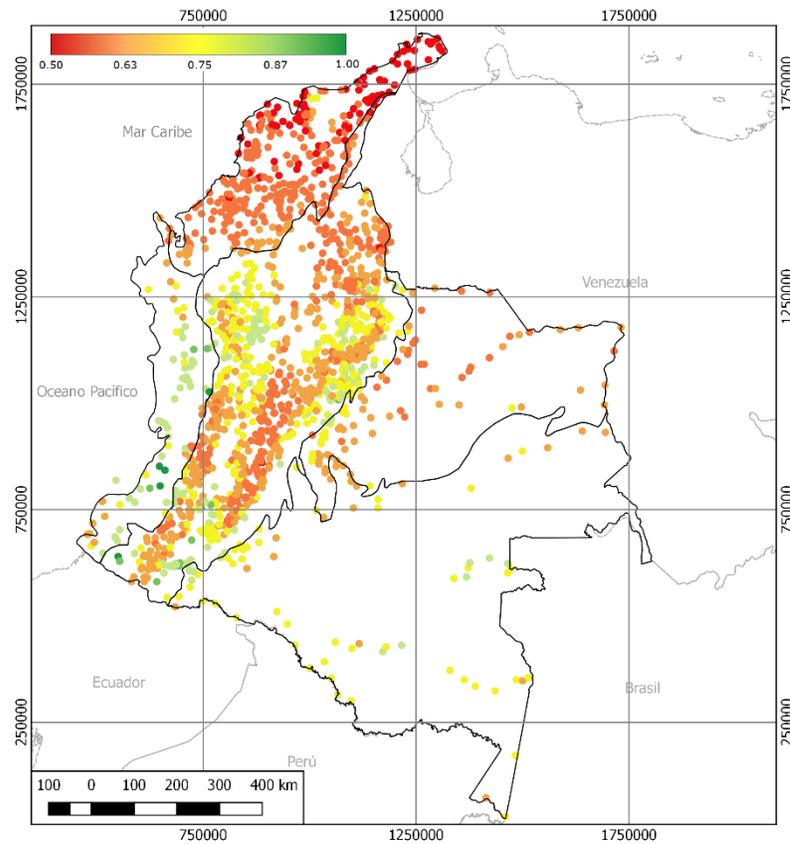


Figura 4.14: Índice de Concentración con información IDEAM.

4.2.4 Correlación de los índices con variables geográficas y pluviométricas

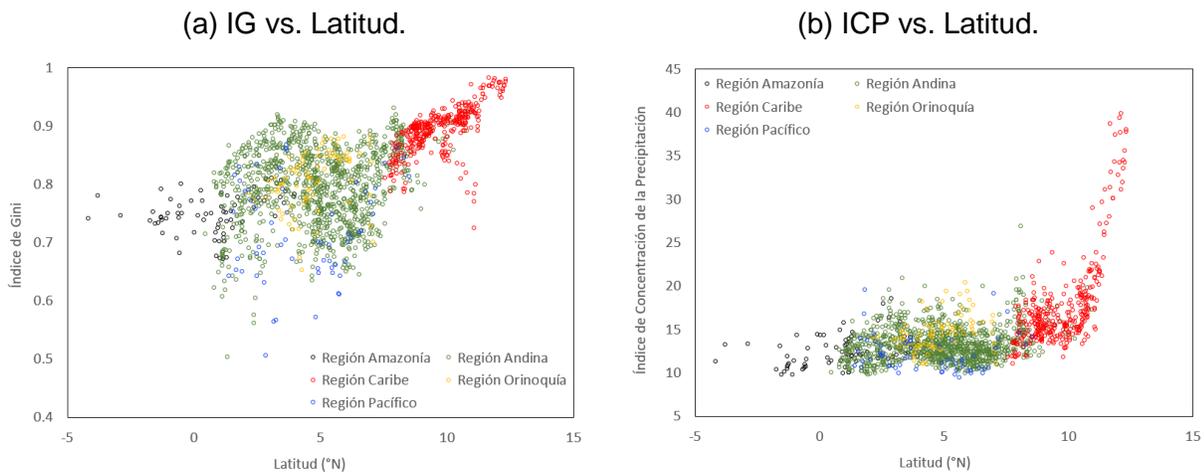
En este aparte se muestran las correlaciones encontradas para los índices de Fournier, Modificado de Fournier, Concentración de la Precipitación y Gini con variables geográficas como latitud, longitud y altitud y variables pluviométricas como la precipitación promedio anual y el número de días con lluvia mediante el uso de gráficos de dispersión sustentados con los resultados del coeficiente de Spearman y el p-value. No se incluye el análisis del Índice de Concentración debido a que los resultados presentados con este índice son iguales a los presentados con el IG.

- Análisis de la correlación entre los índices y la posición geográfica

El Índice de Gini, utilizado para evaluar la concentración de las precipitaciones diarias, muestra una correlación positiva con la latitud (Figura 4.15 a) con un coeficiente de

correlación de 0.53 ($p\text{-value}<0.05$), que corresponde a una correlación media. Esto significa que la concentración diaria de la precipitación aumenta a medida que la latitud aumenta, lo que coincide con el aumento en el Índice de Gini hacia la península de La Guajira.

Respecto al Índice de Gini y la elevación de las estaciones de medición de precipitación, se presenta una correlación negativa con un coeficiente de correlación de Spearman de -0.52 (ver Figura 4.17 a). Esta correlación permite señalar que la concentración diaria de la precipitación aumenta a medida que disminuye la elevación respecto al nivel del mar. Esto se ve reflejado en los altos índices de Gini que se presentan en la región Caribe donde la mayoría de series de precipitación analizadas, son tomadas de puntos que se encuentran muy cerca del nivel del mar. Sin embargo, esta afirmación no abarca todas las estaciones registradas dado que, en la región Pacífico, es posible encontrar también estaciones con elevaciones muy bajas que presentan precipitaciones más distribuidas con respecto a las demás estaciones estudiadas.



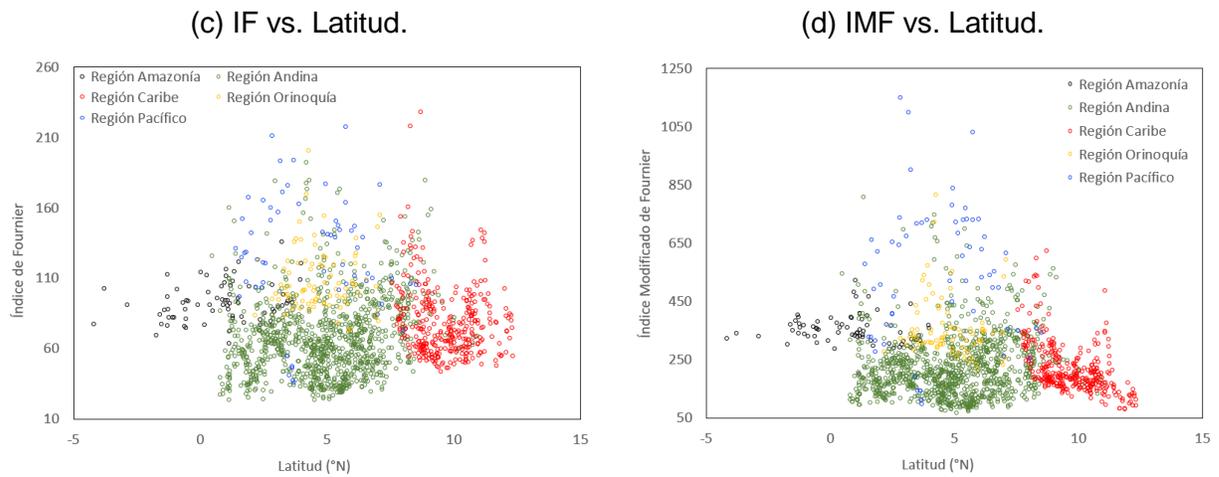
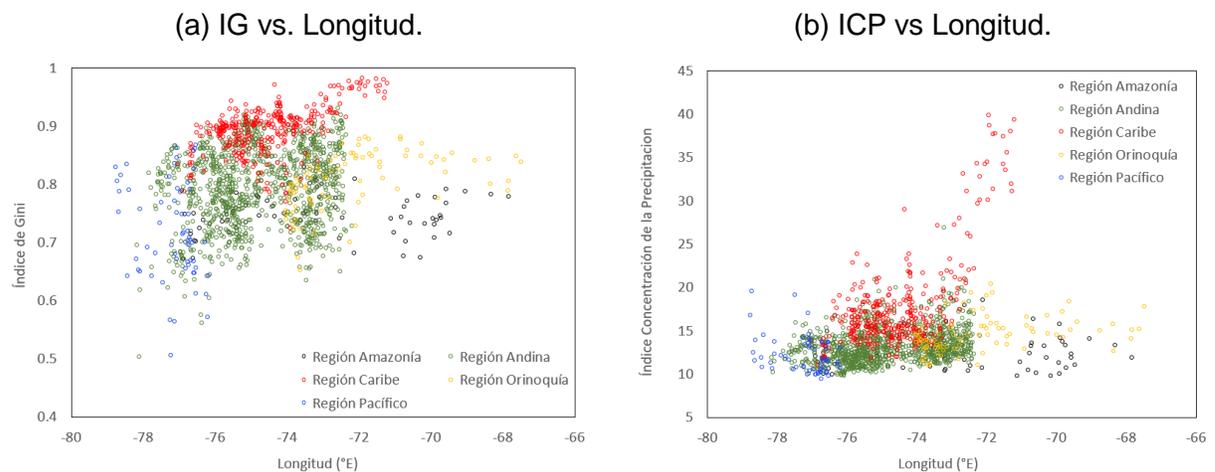


Figura 4.15: Gráficos de dispersión entre los índices y la latitud de las estaciones.

Entre la longitud y el Índice de Gini se presenta una correlación positiva débil, con un coeficiente de Spearman igual a 0.21 (Figura 4.16 a). Esto puede ser explicado por el efecto sobre las precipitaciones que tiene el sistema montañoso andino y en general la cantidad de accidentes geográficos del país.

El comportamiento del Índice de Concentración (IC) propuesto por Martin-Vide (2004), respecto a la latitud, longitud y elevación del sitio donde se presenta la precipitación, es similar al comportamiento mostrado por el Índice de Gini para esta mismas variable geográficas y puede ser observado en la Figura 4.15 a, Figura 4.16 a y Figura 4.17 a.



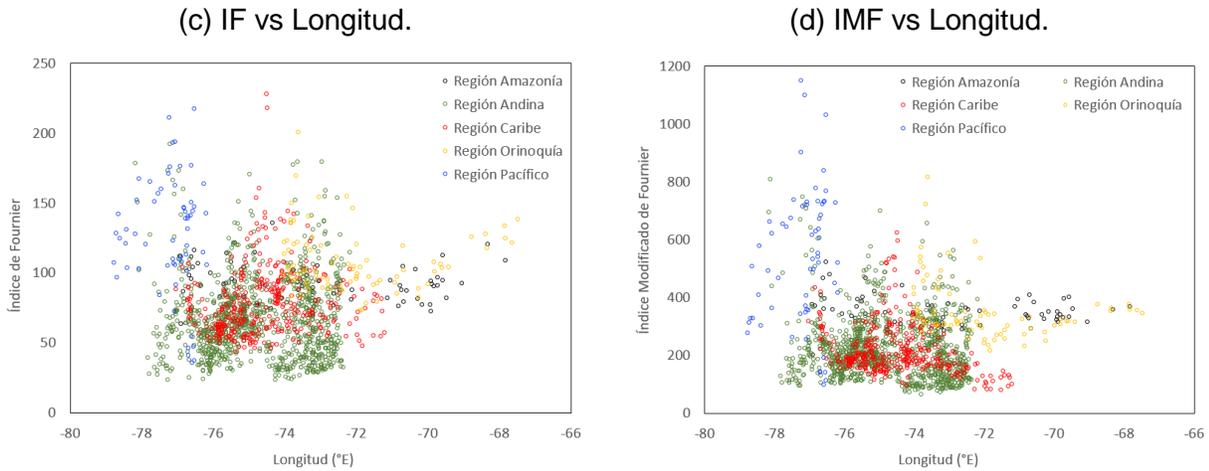
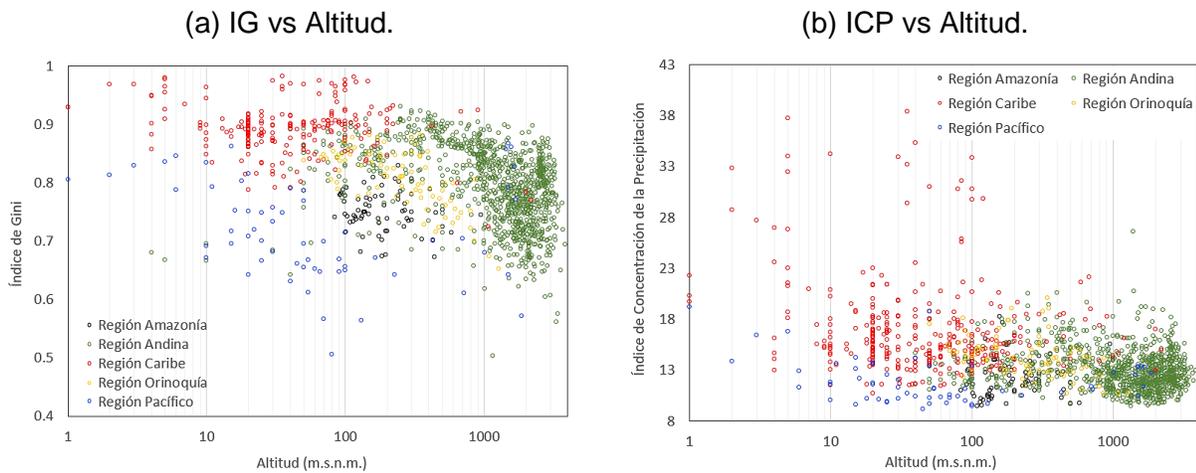


Figura 4.16: Gráficos de dispersión entre los índices y la longitud de las estaciones.

Para el IF y la elevación (Figura 4.17 c), el coeficiente de correlación es de -0.50 ($p\text{-value}<0.05$), según esto, la agresividad de las precipitaciones aumenta a medida que disminuye la altura. Esta misma situación se presenta para el IMF (Figura 4.17 d), cuyo coeficiente de correlación es de -0.34 ($p\text{-value}<0.05$). Para los factores geográficos de longitud y latitud, los valores del coeficiente de correlación de Spearman, respecto al IF, son de 0.08 ($p\text{-value}<0.05$) y de 0.1 ($p\text{-value}<0.05$) respectivamente (Figura 4.15 c, Figura 4.16 c). Para el IMF respecto a la latitud (Figura 4.15 d), el coeficiente de correlación es de -0.09 ($p\text{-value}<0.05$) y para el IMF con respecto a la longitud (Figura 4.16 d), el coeficiente es de -0.07 ($p\text{-value}<0.05$).



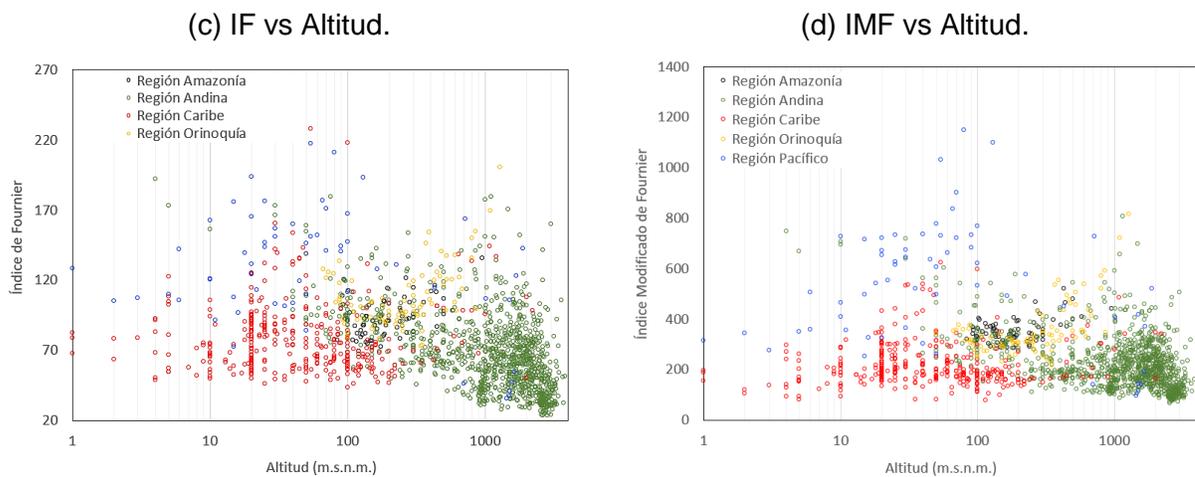


Figura 4.17: Gráficos de dispersión entre los índices y la elevación de las estaciones.

El ICP, presenta un comportamiento similar al observado con el Índice de Gini. Se tienen correlaciones significativas del ICP con la latitud y la elevación, para las cuales, el valor del coeficiente de correlación de Spearman es de 0.46 ($p\text{-value} < 0.05$) y -0.39 ($p\text{-value} < 0.05$) respectivamente. Entre la longitud geográfica y el Índice de Concentración de la Precipitación, se presenta una correlación positiva débil con un coeficiente de correlación de 0.31.

- Análisis de la correlación entre los índices, la precipitación media anual y los días con lluvia

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de la correlación existente entre el IG, IF, IMF e ICP con la precipitación media anual y los días de lluvia medios anuales presentados en cada sitio de medición de precipitación del IDEAM. Para esto se utiliza el coeficiente de Spearman y el $p\text{-value}$.

La correlación de Spearman del Índice de Gini y la precipitación media anual (Figura 4.18 a) es de -0.57 ($p\text{-value} < 0.05$), lo que revela que para sitios con precipitación promedio anual baja, la concentración de la precipitación, representada por el IG es mayor. Esto coincide con la distribución espacial del Índice de Gini mostrada en la Figura 4.3, donde se observa que, en regiones con precipitaciones medias anuales altas, como las que se presentan en la región Pacífico, el Índice de Gini tiene valores bajos. Una correlación muy similar se presenta entre la precipitación media anual y el Índice de Concentración para la cual el coeficiente de Spearman es de -0.56.

Tanto el Índice de Fournier como el Índice Modificado de Fournier (Figura 4.18 cy d), muestran una correlación positiva fuerte con la precipitación media anual. Para el Índice de Fournier se tiene que el coeficiente de correlación es de 0.77 ($p\text{-value}<0.05$) y para el Índice Modificado de Fournier, el coeficiente de correlación con la precipitación media anual es de 0.96. Esta correlación positiva es alta, significativa incluso al nivel de confianza de 99%. De acuerdo con esto, las zonas con precipitación alta, presentan mayor riesgo de erosión del suelo.

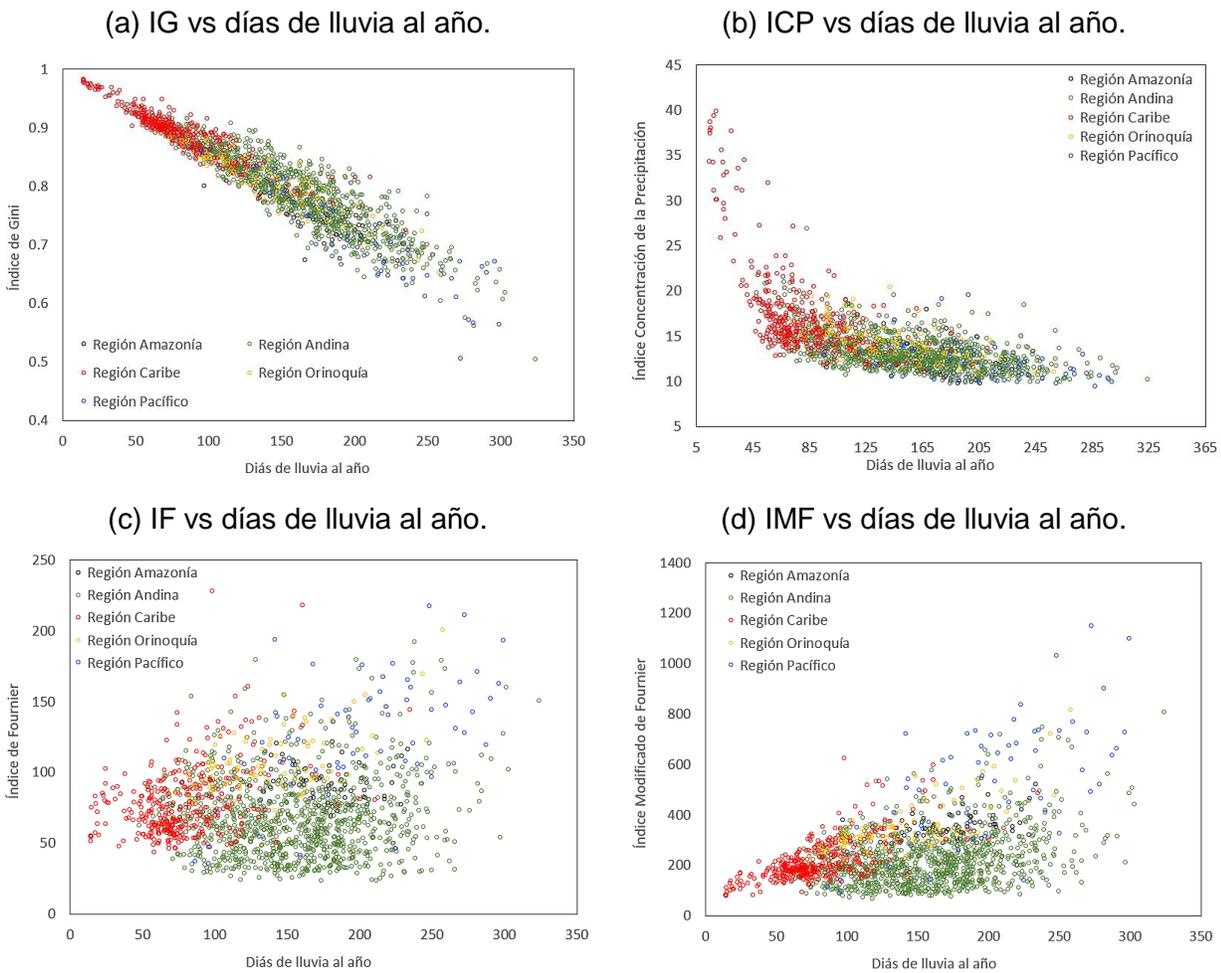


Figura 4.18: Gráficos de dispersión entre los índices y días de lluvia al año en las estaciones.

El Índice de Concentración de la Precipitación presenta una correlación negativa que puede ser considerada entre media y débil ya que su valor es de -0.44 ($p\text{-value}<0.05$). Al igual que con el Índice de Gini esta correlación explica que a medida que las precipitaciones aumentan el Índice de Concentración disminuye.

Respecto al número de días de lluvias y su relación con el Índice de Gini, el Índice de Concentración y el Índice de Concentración de la Precipitación, se encuentran correlaciones negativas bastante buenas que, respectivamente, tienen coeficientes de Spearman de -0.94 , -0.95 y -0.68 . Según esto, cuando el número de días con lluvia disminuye, la concentración de la precipitación aumenta. Para el Índice de Fournier y el Índice Modificado de Fournier la correlación de Spearman con el número de días con lluvia no muestra una correlación significativa. Para el primero el coeficiente de correlación es de 0.037 y para el segundo el coeficiente es de 0.32 .

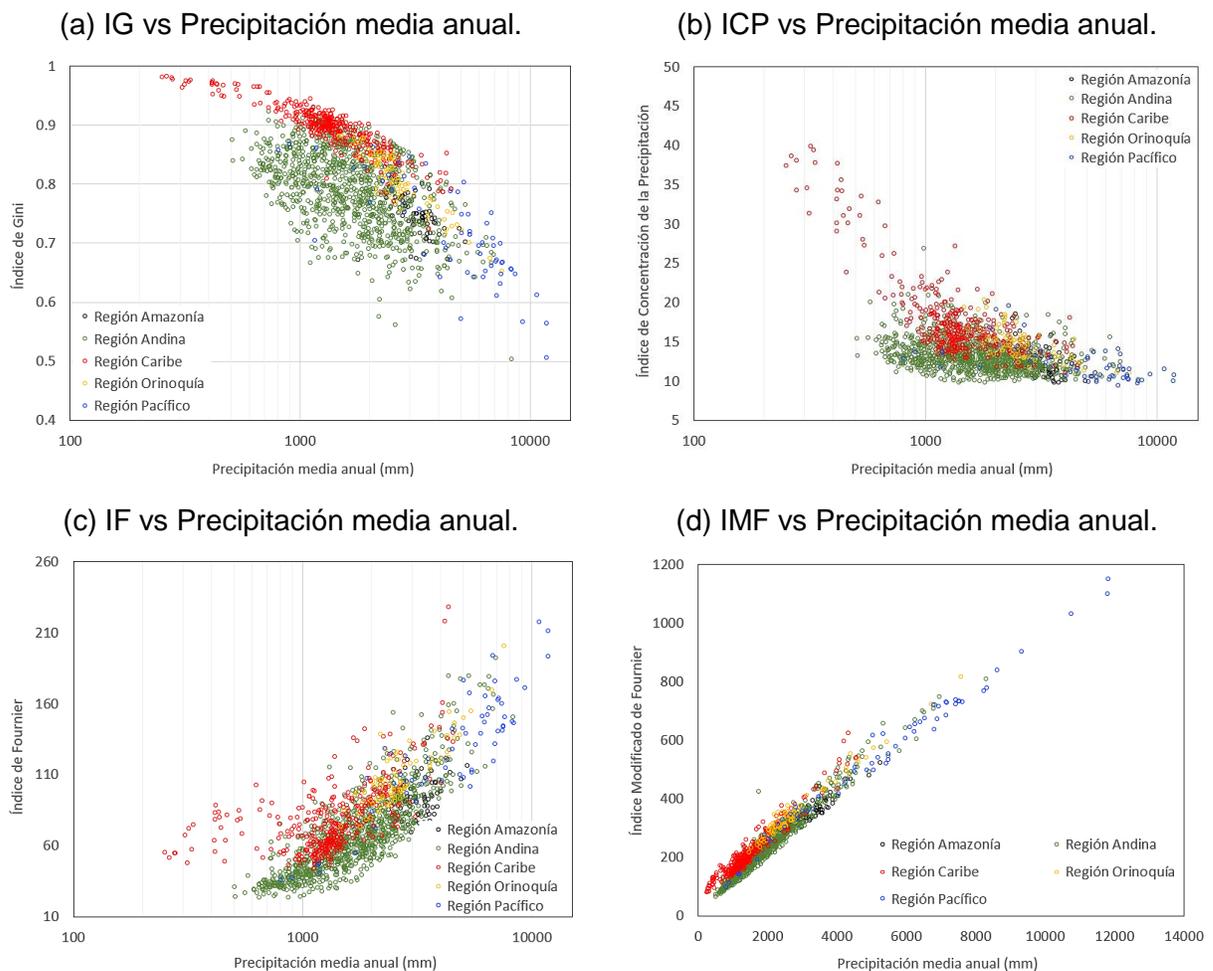


Figura 4.19: Gráficos de dispersión entre los índices y la precipitación media anual de las estaciones.

Tabla 4-1: Coeficiente de correlación de Spearman y p-value para el Índice de Gini (IG), Índice de Fournier (IF), Índice Modificado de Fournier (IMF), Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) e Índice de Concentración (IC) con factores geográficos y pluviométricos. Valores significativos con $\alpha=0.05$ se muestran en negrita.

Índice	Correlación	Latitud (°N)	Longitud (°E)	Elevación (m.s.n.m)	Prep. media anual (mm)	Días de lluvia
IG	ρ	0.54	0.21	-0.52	-0.57	-0.94
	p-value	2.20E-119	5.65E-17	2.58E-111	1.69E-136	0.00E+00
IC	ρ	0.54	0.19	-0.50	-0.56	-0.95
	p-value	1.53E-120	4.27E-14	1.22E-103	6.22E-134	0.00E+00
ICP	ρ	0.46	0.31	-0.39	-0.44	-0.69
	p-value	2.76E-86	4.92E-37	1.30E-60	1.74E-75	9.28E-223
IF	ρ	0.10	0.08	-0.50	0.77	0.04
	p-value	0.0001	0.002	9.10E-104	1.83E-316	0.135
IMF	ρ	-0.09	-0.07	-0.34	0.96	0.32
	p-value	0.0005	0.003	8.31E-44	0.00E+00	1.10E-39

4.3 Variabilidad temporal de la concentración de la precipitación

El comportamiento temporal de los índices de Gini, Concentración de la Precipitación, Fournier y Modificado de Fournier fue valorado mediante el análisis de tendencias realizado con la prueba Mann-Kendall y evaluado para niveles de confianza del 90% y el 95%, como se muestra en los resultados que se presentan a continuación.

El cálculo de los primeros dos índices mencionados, se hizo a partir de información de precipitación diaria, mientras que para los tres índices restantes se empleó información de precipitación mensual. En este estudio se calculan los índices por año calendario y se evalúa la tendencia de dichos índices para el periodo registrado.

4.3.1 Tendencia a largo plazo del Índice de Gini según prueba Mann-Kendall

El análisis de la tendencia a largo plazo para las 1596 series de precipitación estudiadas (Figura 4.20), muestra que 228 de dichas series, que representan el 11.65% del total de las estaciones, muestran tendencia positiva. De las estaciones mencionadas, 85 tienen tendencia positiva significativa y lo hacen para un nivel de confianza del 90%, mientras que

para un nivel del 95%, se encuentran 52 estaciones con tendencia positiva significativa (ver Figura 4.20).

La magnitud de la tendencia, evaluada mediante la prueba Sen, indica que la serie de precipitación que exhibe la mayor variación para un largo plazo corresponde a la estación meteorológica Pte Saladoblando, localizada sobre la región Andina en el alto Magdalena.

La variación del Índice de Gini en esta estación, para los 35 años de registro con los que cuenta, es de 0.031. El valor del IG para esta serie de precipitación es de 0.78. Es posible concluir que, para este punto, la concentración de la precipitación ha aumentado en el tiempo. La tendencia de esta serie es significativa para un nivel del 95%.

En general, las series del Índice de Gini que muestran una tendencia positiva significativa con un nivel de confianza del 90% se localizan en la región Andina sobre el Alto Magdalena, el Valle del Cauca, el altiplano Cundiboyacense y la vertiente llanera de la cordillera oriental. En la región Caribe, se observan tendencias positivas sobre la depresión Momposina y los valles de los ríos Sinú y San Jorge. Para la región Orinoquía los aumentos en la concentración se dan sobre la llanura del río Meta y el piedemonte llanero, y para la región Pacífico se encuentran en las llanuras costeras del Pacífico.

121 estaciones (7.58% del total), presentan una tendencia negativa, pero solo 56 de estas lo hacen para un nivel de confianza del 90% y 15 estaciones para un nivel de confianza del 95%. Las estaciones para las que el Índice de Gini ha disminuido en el tiempo se ubican en la cordillera central meridional, la montaña Antioqueña y el Magdalena medio en la región Andina y los valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan en el Pacífico.

La estación El Campanario en la serranía de los Motilones en la región Andina, posee la mayor variación del Índice del Gini en el tiempo para las series con tendencia negativa, con una disminución de 0.03, para los 50 años analizados. Según esto, en la zona mencionada las precipitaciones se han distribuido mejor en el tiempo con el pasar de los años.

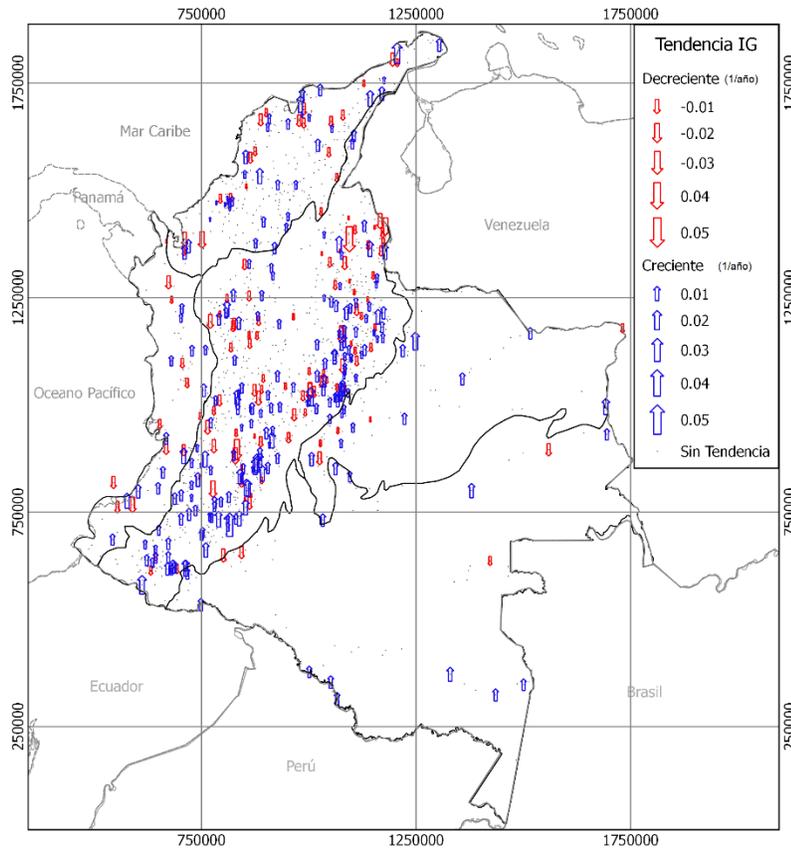


Figura 4.20: Resultados del análisis de tendencias para el Índice de Gini. El tamaño de las flechas es proporcional a la magnitud de la tendencia.

4.3.2 Tendencia a largo plazo del Índice de Concentración de la Precipitación según prueba Mann-Kendall

En 1283 estaciones (80.34% del total de series analizado), no se presenta tendencia significativa para los niveles de 90% y 95%. El número de estaciones meteorológicas con tendencia negativa para un nivel de confianza del 90% es mayor que aquellas con tendencia positiva (184 vs. 130) y para un nivel de confianza del 95% la diferencia es de 120 estaciones con tendencia negativa para el ICP, contra 62 estaciones con tendencia positiva.

Las tendencias positivas del Índice de Concentración de la Precipitación se concentran en el altiplano Cundiboyacense, el alto Magdalena, el altiplano de Popayán y en cercanías a la Ciénaga Grande de Santa Marta. Mientras que los Índices de Concentración de la Precipitación con tendencia negativa, se sitúan a todo lo largo de la región Caribe con mayor presencia en la depresión Momposina.

En la región Andina, la mayoría de puntos con tendencia negativa para un nivel de confianza del 90% se hallan en el cañón del Cauca, las montañas Santandereanas y Antioqueñas, el sector nororiental de la cordillera occidental, el macizo de Santurbán, el Catatumbo y la vertiente Magdalenense de la cordillera oriental. Sobre la región Pacífico, las disminuciones en el ICP se dan en los valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan y las llanuras costeras del Pacífico.

En la (Figura 4.21), se puede observar que la disminución de la concentración de la precipitación se presenta en regiones similares cuando se analiza con el Índice de Gini.

Respecto a la magnitud de la tendencia, en la estación Monterrey Forestal, dispuesta en la depresión Momposina sobre la región Caribe, se tiene la mayor disminución en el Índice de Concentración de la Precipitación con un valor para la prueba de Sen de 1.11 para 28 años de registro. Según este resultado, en un área de la depresión Momposina, la estacionalidad entre los periodos de precipitación ha ido disminuyendo con el paso de los años.

Por otro lado, sobre la serranía de los motilones se encuentra la estación El Hoyo. Esta estación muestra un aumento en el ICP de 3.92 en los 36 años de registro estudiados. Para esta estación, el ICP es de 26.92. Lo que sugiere, según la clasificación dada por Oliver (1980), que las precipitaciones son altamente estacionales y que, según lo encontrado en este estudio, tiende a aumentar dicha estacionalidad.

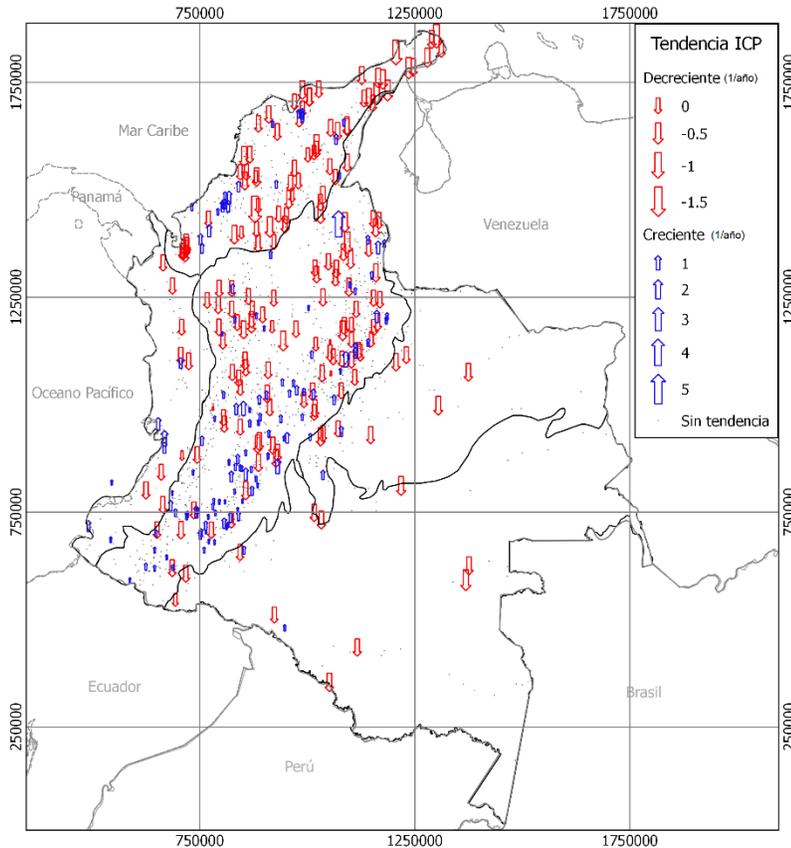


Figura 4.21: Resultados del análisis de tendencias para el Índice de Concentración de la Precipitación. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.

4.3.3 Tendencia a largo plazo del Índice de Fournier y el Índice Modificado de Fournier según prueba Mann-Kendall

Las tendencias positivas con un nivel de confianza del 90% para el Índice de Fournier, se dan en la península de La Guajira, el delta del río Magdalena, el altiplano Cundiboyacense, la cordillera central meridional, el altiplano de Popayán y los valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan (Figura 4.22). Las estaciones con tendencia positiva son 146, lo que representa el 9.14% del total.

El Índice Modificado de Fournier (Figura 4.23), al mismo nivel de confianza, muestra un aumento en las estaciones para las cuales la tendencia es positiva (231 estaciones, 14.5% de las estaciones totales). Dicho aumento se ve reflejado en el altiplano Cundiboyacense, macizo volcánico, alto Magdalena, macizo de Santurbán, región Caribe en general y valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan.

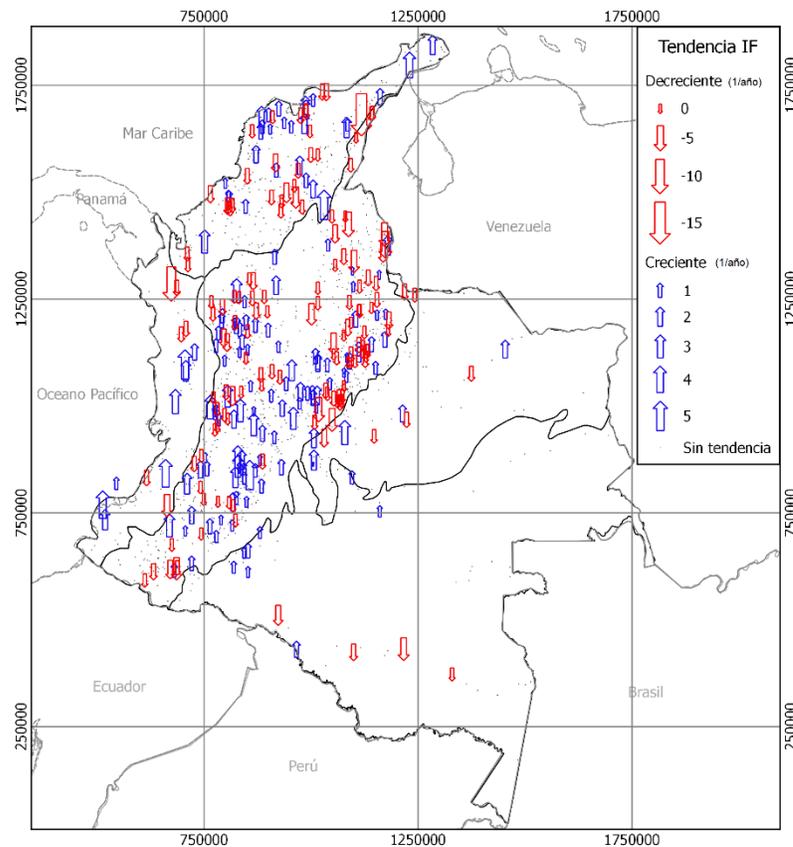


Figura 4.22: Resultados del análisis de tendencias para el Índice de Fournier. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.

La estación Guacamayo, tiene como resultado para la prueba de Sen un valor de 5.47 para el análisis del Índice de Fournier y se encuentra ubicada en la depresión Momposina en la región Caribe; es la estación con la tendencia positiva de mayor magnitud. La clasificación para esta zona según el Índice de Fournier (228.01), es de precipitaciones con agresividad muy alta. Para esta estación el periodo de registro fue de 49 años.

La mayor variación del Índice Modificado de Fournier para tendencia positiva se da sobre la estación Yurumangi (valor prueba de Sen igual a 23.56), en las llanuras costeras del Pacífico. Su clasificación, según el Índice Modificado de Fournier, es de precipitaciones de agresividad muy alta y según los resultados obtenidos con la prueba de Mann – Kendall, la agresividad de las precipitaciones va en aumento. Cabe mencionar que la precipitación en esta zona está catalogada como estacional moderado de acuerdo al valor del Índice de Concentración de la Precipitación.

Con relación a las tendencias negativas, se identificaron 146 estaciones con un nivel de confianza del 90% y 120 estaciones para un nivel de confianza del 95% para el Índice de Fournier. Para las tendencias del Índice Modificado de Fournier, se observan 166 estaciones con tendencia negativa al 90% de nivel de confianza y 109 para el 95%.

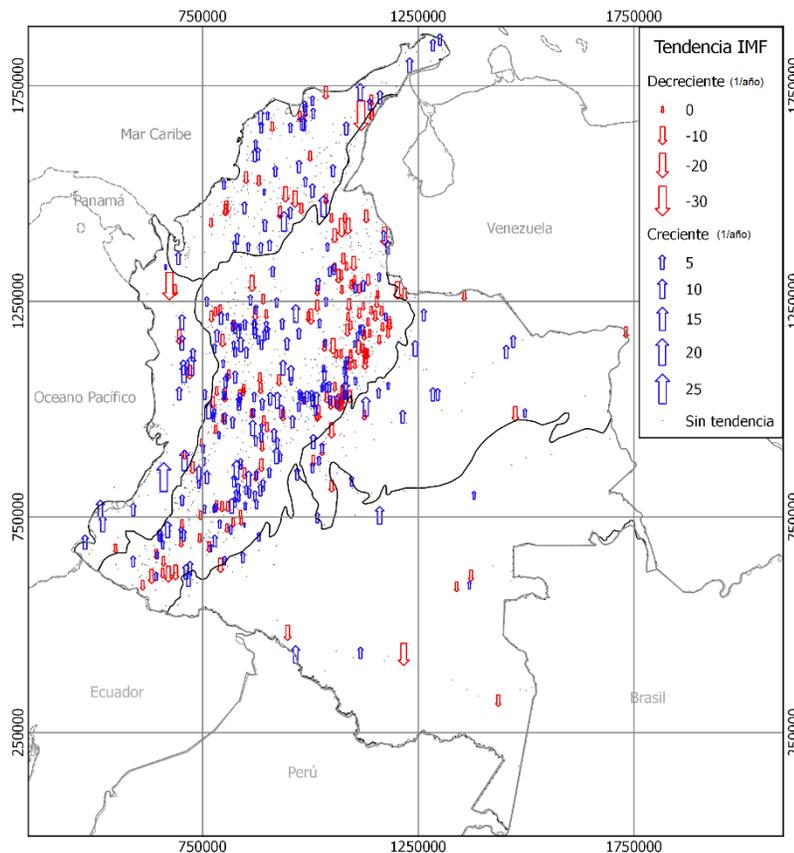


Figura 4.23: Resultados del análisis de tendencias para el Índice Modificado de Fournier. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.

En este punto, es importante recordar que la diferencia entre el Índice de Fournier y el Índice Modificado de Fournier radica en que el primero solo toma para su cálculo la precipitación del mes más lluvioso, mientras que el segundo considera la precipitación de todos los meses. Esta diferencia puede notarse en el comportamiento de las tendencias identificadas en dichos índices; las estaciones con tendencia positiva aumentaron en más del 63% entre el IF y el IMF.

4.3.4 Tendencia a largo plazo del número de días de precipitación según prueba Mann-Kendall

Para cada año hidrológico se identificaron los días con precipitación y mediante la prueba Mann-Kendall se estudió su comportamiento con el fin de verificar si el aumento o disminución de los días con lluvia guarda una relación con las tendencias observadas para los índices (Figura 4.24).

El 24.86% de las estaciones muestra una tendencia positiva al 90% de nivel de confianza (397 estaciones). Estas estaciones se distribuyen a lo largo del territorio colombiano con 273 estaciones en la región Andina, 26% del total de estaciones emplazadas en esta región; 78 estaciones sobre la región Caribe, 22.3% de las estaciones que se tienen en esta región, 18 estaciones en la región Amazonia que corresponden al 25% del total de estaciones que están en esta región, 16 estaciones en la región Orinoquía que representan el 24% de las estaciones de esta zona y 12 estaciones en la región Pacífico que equivalen al 19.6%. Las estaciones que presentan un aumento en los días con lluvia, se distribuyen uniformemente en las regiones naturales principales según lo expuesto anteriormente.

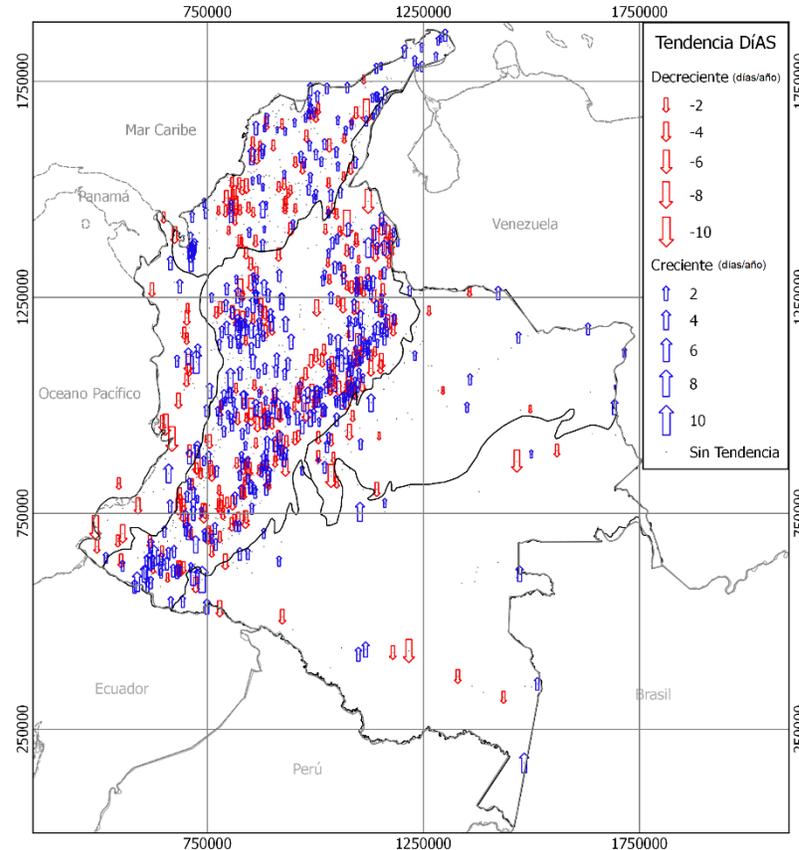


Figura 4.24: Resultados del análisis de tendencias para los días de lluvia. El tamaño de las flechas está ligado a la magnitud de la tendencia.

Con un aumento promedio de 7.6 días con lluvia al año, la estación Mocoa, localizada en el piedemonte amazónico, es la estación con la mayor variación de las estudiadas. Esta zona, según los índices estudiados, presenta precipitaciones con un carácter estacional moderado según el ICP, y la agresividad de las mismas puede ser clasificada como muy alta según el IF y como muy alta para el IMF. El Índice de Gini es de 0.71, es decir, que el 20% de los días con lluvia aporta el 55% de la precipitación total. El Índice de Concentración para esta estación es de 0.74 y su interpretación es similar a la realizada para el Índice de Gini.

Con tendencia negativa se identifican 289 estaciones (18.1% del total) para un nivel de confianza del 90%. Estas tendencias fueron encontradas principalmente en los valles de los ríos Sinú y San Jorge, la depresión Momposina, la cordillera central meridional y en el alto Magdalena. La región Amazonía es la región que presenta el menor porcentaje de estaciones con tendencia negativa con un 12.5% del total de las 72 estaciones estudiadas para esta región.

La estación El Hoyo, mencionada anteriormente, presenta la zona donde es mayor la tasa de disminución de los días de lluvia según la prueba Sen aplicada, con una disminución aproximado de 8.1 días de lluvia al año.

4.3.5 Ciclo anual

A partir de los resultados obtenidos por Viviana Urrea en su tesis de maestría (Urrea, et al., 2017), en la cual se determinó, para 1706 estaciones de medición de precipitación del IDEAM, el inicio de las temporadas secas y húmedas y la duración de las mismas en un año promedio, fue posible determinar si la concentración de la precipitación se ve afectada por las variaciones de la precipitación según el ciclo anual de cada sitio.

El Índice de Gini se calcula con los datos de precipitación diaria para cada una de las temporadas, una temporada seca y una temporada húmeda para los sitios con régimen de precipitación unimodal y dos temporadas secas y dos húmedas para los lugares con régimen de precipitación bimodal. Los resultados de este análisis se presentan a continuación.

- Régimen unimodal

El ciclo comienza con la temporada húmeda al sur de la Amazonía y asciende en dirección norte-occidente hasta la región Caribe (Urrea, et al., 2017). De las estaciones estudiadas, 568 presentan un régimen de precipitación unimodal y se encuentran ubicadas en las regiones Amazonía, Orinoquía, el costado oriental de la región Andina, la región Pacífico y la parte sur de la región Caribe. Para cada una de estas estaciones se calcularon dos Índices de Gini, uno que representa el comportamiento de la precipitación en la temporada de lluvias y otro para la temporada seca.

El Índice de Gini para la temporada húmeda en los sitios con régimen de precipitación unimodal, varía entre 0.61 y 0.82, con las lluvias más concentradas localizadas en la región Caribe en la península de La Guajira y sobre la región Andina en el alto Magdalena y al norte sobre el macizo de Santurbán y el Catatumbo (Figura 4.25). El valor más bajo del Índice de Gini, que refleja precipitaciones más distribuidas en el tiempo, se presenta sobre la región Andina en el sector nororiental de la cordillera occidental.

En las regiones Amazonía y Orinoquía, para los sitios estudiados, el valor del Índice de Gini está entre 0.77 y 0.78 lo que indica que, para la temporada húmeda, la concentración de la precipitación presenta, espacialmente, un comportamiento constante.

Otros sitios que presentan un Índice de Gini entre 0.77 y 0.78, se localizan sobre la vertiente llanera de la cordillera oriental, el nudo de los pastos, el macizo colombiano y la montaña antioqueña en la región Andina y en la región Caribe en el valle de los ríos Sinú y San Jorge, la depresión momposina, las sabanas del Caribe y el delta del río Magdalena.

En los valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan, entre los 5°N y los 6°N se presentan índices de Gini iguales a 0.62; hacia el norte se da un aumento en el valor del índice hasta llegar a 0.68 cerca de los 8.5°N en la región Pacífico. El aumento del índice se sigue evidenciando sobre el golfo de Urabá en la región Caribe, donde las precipitaciones comienzan a ser más concentradas y se encuentran índices mayores a 0.70.

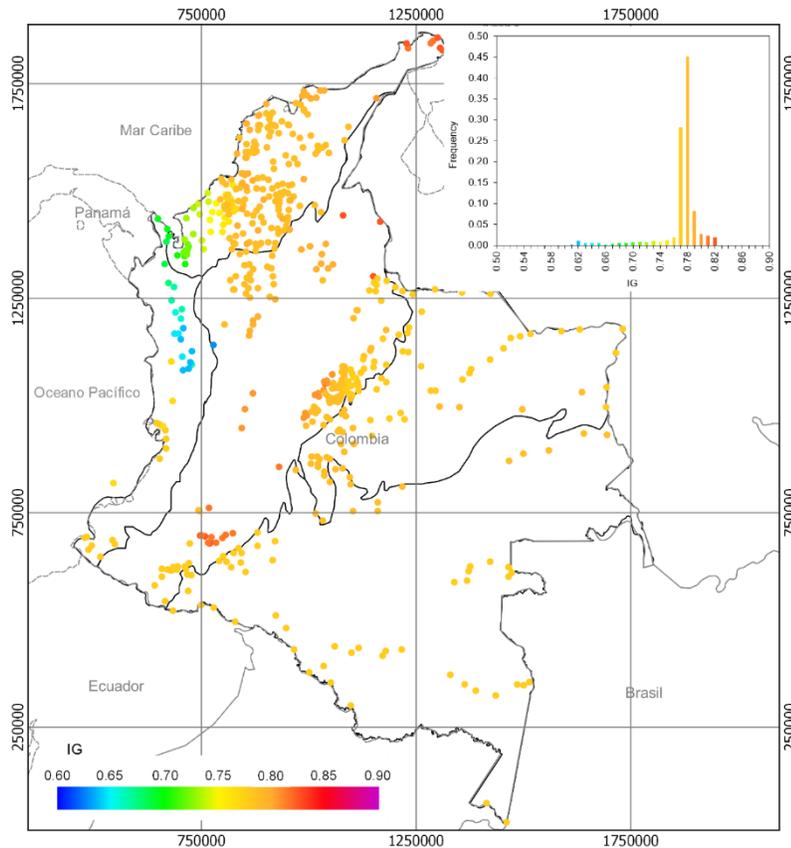


Figura 4.25: Índice de Gini para la temporada húmeda de los sitios con ciclo anual unimodal con información IDEAM.

Para el mes de mayo, cuando la ZCIT está lo suficientemente alejada del sur de la Amazonía, comienza la temporada seca, siguiendo el mismo patrón de la temporada húmeda; el inicio de la temporada se desplaza en dirección norte-occidente desde el sur de la Amazonía a mitad de abril hasta llegar al Caribe entre los meses de noviembre y diciembre (Urrea, et al., 2017).

La temporada seca muestra para los sitios con régimen de precipitación unimodal, un aumento en el Índice de Gini alcanzando valores que oscilan entre 0.65 y 0.9. Los cambios más fuertes en el Índice se dan sobre la costa del mar Caribe y el valle del río Sinú. Para estos lugares el aumento fue de 0.1 mientras que lugares más al interior de la costa presentaron variaciones de 0.09 y 0.08 en el índice.

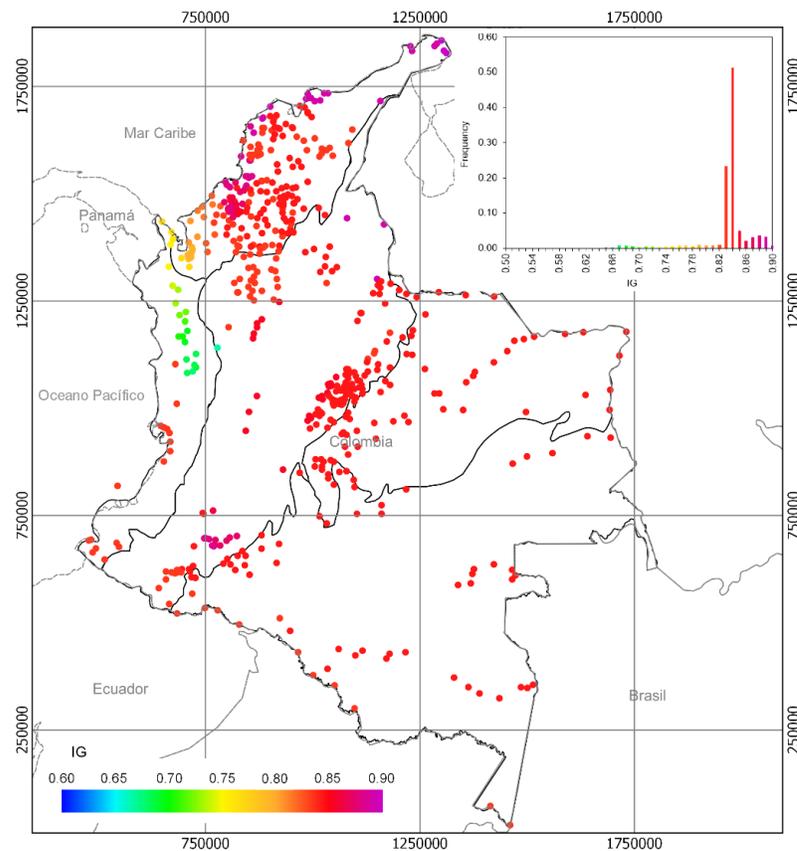


Figura 4.26: Índice de Gini para la temporada seca de los sitios con ciclo anual unimodal con información IDEAM.

Al igual que para la temporada húmeda, en la temporada seca los sitios localizados en la región Amazonía y Orinoquía y algunos puntos sobre las regiones Andina y Caribe, conservan una concentración de la precipitación similar con cambios en el índice de 0.06 y 0.07.

Las estaciones localizadas en la parte norte de la región Pacífico, donde se dan precipitaciones más distribuidas en el tiempo, tienen un incremento en el Índice de Gini de 0.04, siendo este el cambio más bajo registrado en los lugares con régimen bimodal por lo que es posible concluir que el comportamiento de la precipitación, en cuanto a su concentración, no se altera significativamente al pasar de la temporada húmeda a la temporada seca en estos lugares.

- Régimen bimodal

El inicio de la primera temporada de lluvias, sigue el mismo comportamiento encontrado en el régimen unimodal; comienza en el suroriente de la región Andina y se desplaza en dirección noroccidente para llegar al norte de la misma región. La segunda temporada húmeda se manifiesta en el sentido contrario (dirección suroriente) cuando la ZCIT se desplaza hacia el sur. Por su parte, el inicio de la primera temporada seca parece no tener un patrón espacial definido. El inicio de la segunda temporada seca sí parece tener un comportamiento espacial definido; en el norte y centro de la región Andina comienza a principios de diciembre y al sur de la región Andina y en las estribaciones de la cordillera occidental en la región Pacífica, comienza a mediados de diciembre. Muy al sur de las regiones Andina y Pacífica comienza a finales de diciembre (Urrea, et al., 2017).

En la primera temporada húmeda, el Índice de Gini oscila entre 0.59 y 0.83, los valores más altos (0.83) se dan en la zona del Catatumbo y el macizo de Santurbán. Desde el alto Magdalena, donde el Índice de Gini toma un valor de 0.82, la precipitación comienza a mostrarse más distribuida en el tiempo a medida que se avanza en dirección noroccidente hasta llegar a un índice de 0.79 sobre la zona de la montaña antioqueña y el Magdalena medio.

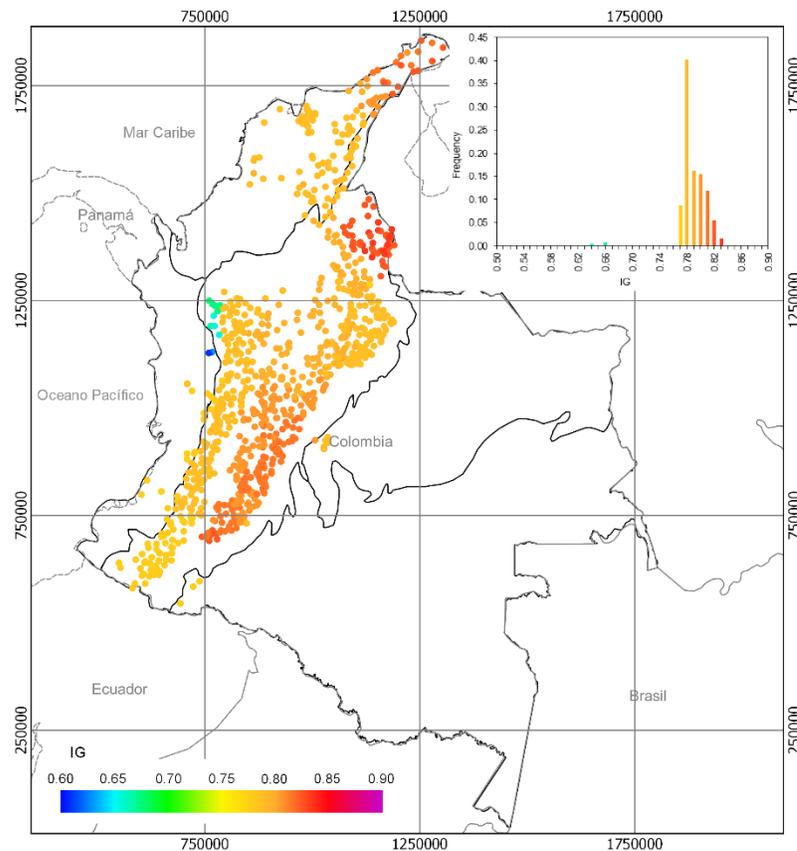


Figura 4.27: Índice de Gini para la primera temporada húmeda de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.

Sobre el valle del Cauca, el cañón del Cauca, el altiplano cundiboyacense, la montaña santandereana y parte oriental de la región Caribe, la distribución de la precipitación en el tiempo muestra un comportamiento similar y esto se ve reflejado en el valor del Índice de Gini que, para todas las estaciones de medición presentes en esta zona, toma un valor de 0.78.

Al igual que en la temporada húmeda de los sitios con régimen de precipitación unimodal, los valores más bajos del Índice de Gini para la primera temporada húmeda de los lugares con régimen bimodal, se presentan entre los 5.5°N y los 8.5°N con valores que van entre 0.61 y aumentan hacia el norte hasta llegar a 0.66.

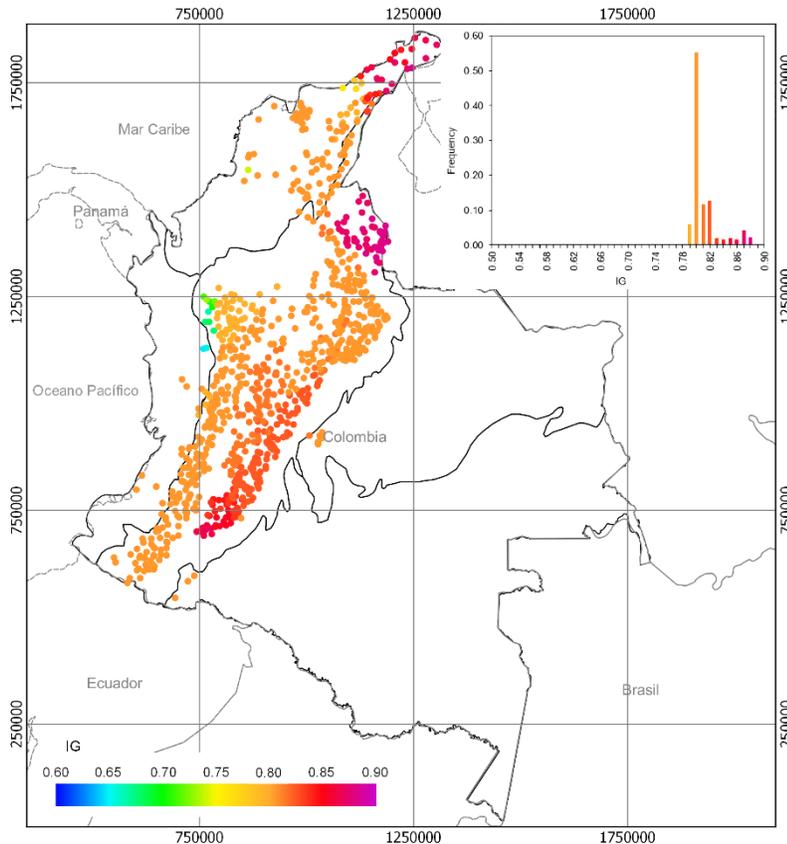


Figura 4.28: Índice de Gini para la segunda temporada húmeda de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.

Respecto a la primera temporada húmeda, el Índice de Gini para la segunda temporada húmeda oscila entre valores más altos mostrando una mayor concentración de la precipitación para esta segunda época, sin embargo, espacialmente se conserva la misma distribución.

Los valores altos del índice, que para esta temporada son del orden de 0.88 se dan en la parte nororiental de la región Andina. Índices entre 0.87 y 0.81 se presentan en la parte central de la región disminuyendo a medida que se avanza hacia el norte. En la parte más al occidente de la región Andina y sobre el altiplano cundiboyacense y la montaña santandereana el índice toma un valor de 0.80. Los sitios con los índices más bajos para la segunda temporada (0.63 a 0.69), se localizan en la misma zona que lo hacían en la segunda temporada sobre el sector nororiental de la cordillera occidental.

La mayor diferencia entre índices para estas dos temporadas húmedas, se da en los lugares donde la concentración es más alta (Catatumbo y macizo de Santurbán); entre la primera

temporada húmeda y la segunda, el Índice de Gini aumenta en 0.05. Según los registros de precipitación de estos sitios y la duración de cada temporada, la precipitación media diaria, expresada en mm/día, es más alta para la segunda temporada húmeda.

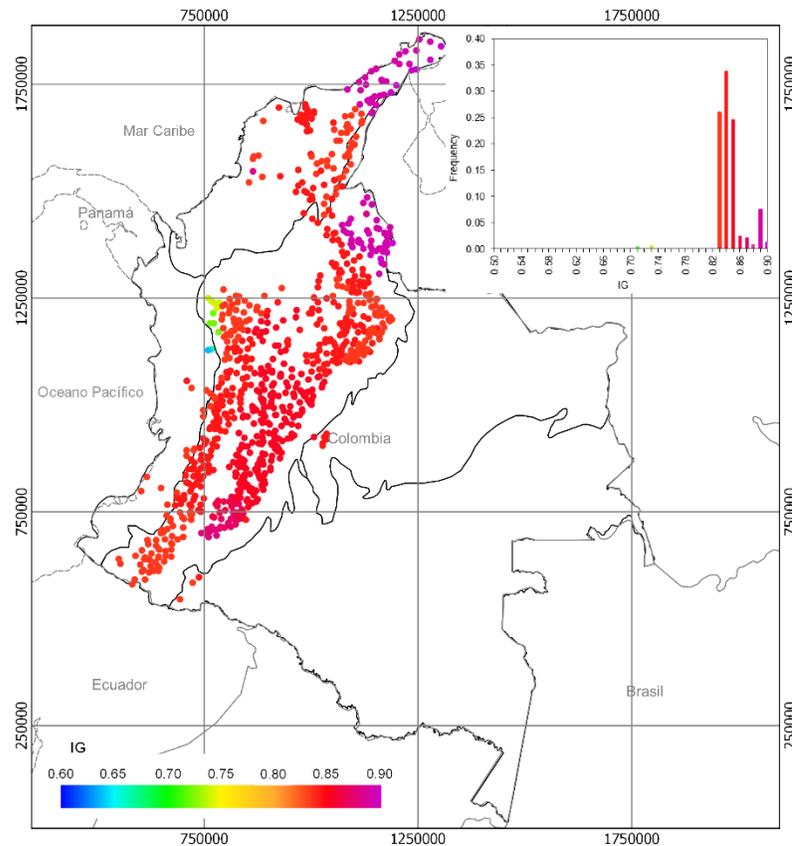


Figura 4.29: Índice de Gini para la primera temporada seca de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.

El inicio de la primera temporada seca parece no tener un patrón espacial definido; en toda la región, inicia a finales de mayo y durante el mes de junio principalmente (Urrea, Ochoa, & Mesa, 2017). El aumento de la concentración de la precipitación durante la primera temporada seca se hace más evidente al norte de las regiones Caribe y Andina con un índice de 0.90. Los sitios con régimen bimodal estudiados, presentan en su mayoría para esta temporada, índices de Gini que varían entre 0.83 y 0.85. Los lugares con precipitaciones más distribuidas muestran índices que oscilan de 0.62 a 0.7.

La segunda temporada seca presenta precipitaciones más distribuidas, hecho que se ve reflejado en la disminución del Índice de Gini respecto al presentado en la primera temporada seca. Esta primera temporada también reporta precipitaciones promedio diarias

menores que en la segunda temporada. Para el 60% de los sitios estudiados se calcula, para la segunda temporada seca, un Índice de Gini de 0.82.

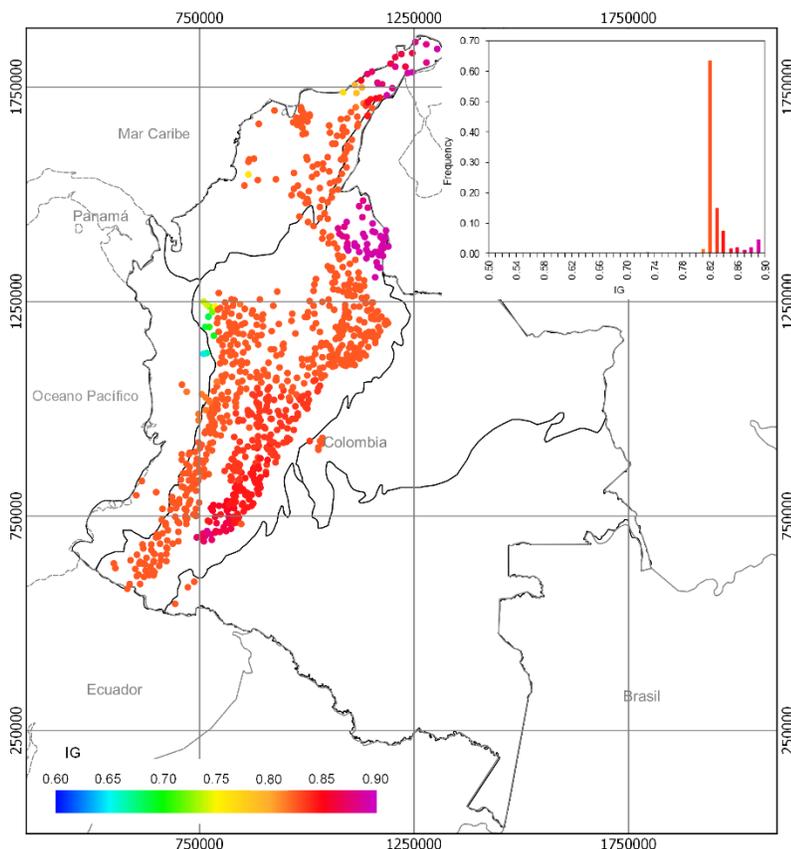


Figura 4.30: Índice de Gini para la segunda temporada seca de los sitios con ciclo anual bimodal con información IDEAM.

- Efecto del fenómeno ENSO sobre el ciclo anual de la concentración de la precipitación
- Con el fin de realizar un análisis exploratorio de los posibles efectos de los fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la concentración de la precipitación diaria en Colombia, se tomó como referencia el fenómeno ENSO y se evaluó el ciclo anual para las regiones naturales de Colombia considerando la ocurrencia de dicho fenómeno.

Para esto, se calculó el Índice de Gini a partir de los datos de lluvia diarios para cada mes dentro del periodo de registro de las estaciones del IDEAM utilizadas en este estudio.

Posteriormente y utilizando la información del índice ONI, reportado para cada mes desde el año 1950 hasta el 2017, se filtraron los índices calculados en tres grupos, El Niño, La Niña y Normal. De esta manera, para el fenómeno El Niño, se seleccionaron los índices de

Gini de cada mes para el cual el índice ONI tomaba un valor mayor a 0.5 y dentro de este grupo, fueron formados subgrupos de índices Gini para cada mes del año. Así, se tenía un grupo de índices calculados para los meses de enero en los cuales se presentó el fenómeno El Niño, series de índices para los meses de julio para los que el índice ONI reportaba incidencia de La Niña y así para los demás meses.

A partir de esta clasificación, se obtuvieron los resultados por regiones que se presentan a continuación. Cabe resaltar que el valor del Índice de Gini se ve reflejado en el color de cada recuadro de la gráfica según la rampa de colores presentada en cada figura. Los valores que se encuentran dentro de cada recuadro, indican el número de meses promedio que presentaron el fenómeno descrito en la región a la que pertenece la gráfica.

- Región Amazonía

Los resultados para la región Amazonía muestran un comportamiento unimodal de la concentración de la precipitación diaria a lo largo del ciclo anual para las fases extremas del fenómeno ENSO y para la fase neutra, con una temporada de precipitaciones distribuidas que se da entre los meses de abril y julio y una temporada de lluvias concentradas entre los meses de agosto a marzo (Figura 4.31).

Las precipitaciones más concentradas, marcadas con un Índice de Gini de 0.82, se presentan para la condición normal del fenómeno ENSO durante el mes de enero, mientras que las lluvias más distribuidas en el tiempo, se presentan para esta misma condición, pero durante el mes de junio. Respecto a las fases extremas del ENSO, se puede observar que para los primeros 6 meses del año, la precipitación presenta mayores concentraciones cuando se sienten los efectos de la fase El Niño. Por otro lado, los restantes 6 meses, la concentración de la lluvia es mayor cuando ocurre La Niña.

La cantidad promedio de meses que registran eventos El Niño y La Niña, es muy similar mientras que la mayor cantidad de meses estudiados presentaban condiciones normales. El valor del Índice de Gini para el ciclo anual de la concentración de la precipitación en la región Amazonía, varía entre 0.63 a 0.82.

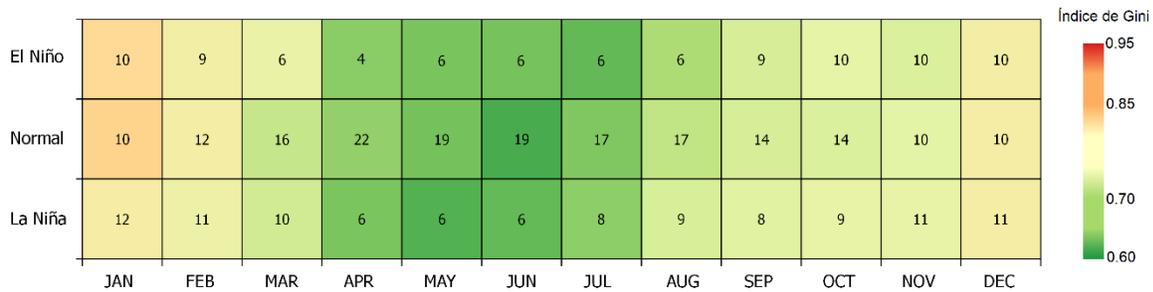


Figura 4.31: Ciclo anual región Amazonía con influencia del fenómeno ENSO.

▪ Región Andina

El ciclo anual de la concentración de la precipitación en la región Andina muestra dos temporadas de lluvias distribuidas en el tiempo que se presentan durante los meses de abril - mayo y octubre – noviembre, y dos temporadas con precipitaciones más concentradas entre junio – septiembre y diciembre – marzo.

El efecto de las fases extremas del fenómeno ENSO se hace evidente durante el mes de enero para el cual, la concentración de la precipitación aumenta con respecto a la normal cuando se está en la fase El Niño y disminuye, también con respecto a la normal, cuando se presenta la fase La Niña.

En general, durante La Niña, la distribución de la precipitación aumenta sobre la región Andina y este aumento, si bien se da en todos los meses, es más fuerte durante el mes de diciembre. De igual manera, la influencia de El Niño, se ve reflejada en un aumento de la concentración de la lluvia, siendo este más evidente durante el mes de enero.

Durante La Niña, las precipitaciones más distribuidas se presentan para la segunda temporada de precipitaciones distribuidas (octubre – noviembre).



Figura 4.32: Ciclo anual región Andina con influencia del fenómeno ENSO.

Según la **Figura 4.32**, es posible concluir que, para la región Andina, las fases del ENSO potencian los efectos del ciclo anual. Aumenta la concentración de las temporadas secas y disminuye la misma durante las temporadas húmedas. El valor del Índice de Gini para el ciclo anual de la concentración de la precipitación en la región Andina, varía entre 0.69 a 0.88.

- Región Caribe

La **Figura 4.33**, muestra sobre la región Caribe un claro ciclo anual unimodal con precipitaciones de menor concentración para los meses de abril a noviembre, mientras que para los meses restantes (diciembre – marzo), se tiene un aumento en dicha concentración.

Con respecto las otras regiones naturales, la región Caribe es la zona que exhibe las mayores concentraciones de precipitación del país con Índices de Gini de hasta 0.95 (mes de enero en condición El Niño), lo que significa que, para este mes en esta región, el 5% de los días (1.55 días), aporta el 85% del total de la precipitación registrada para ese mes.

El efecto de la fase La Niña sobre la concentración de la precipitación de la región Caribe, es el de disminuir la concentración respecto al comportamiento que se presenta en condiciones normales. Durante El Niño, por su parte, la concentración de la precipitación aumenta en todos los meses a excepción de abril y mayo para los cuales se conserva.

El valor del Índice de Gini para el ciclo anual de la concentración de la precipitación en la región Caribe, varía entre 0.79 a 0.95.

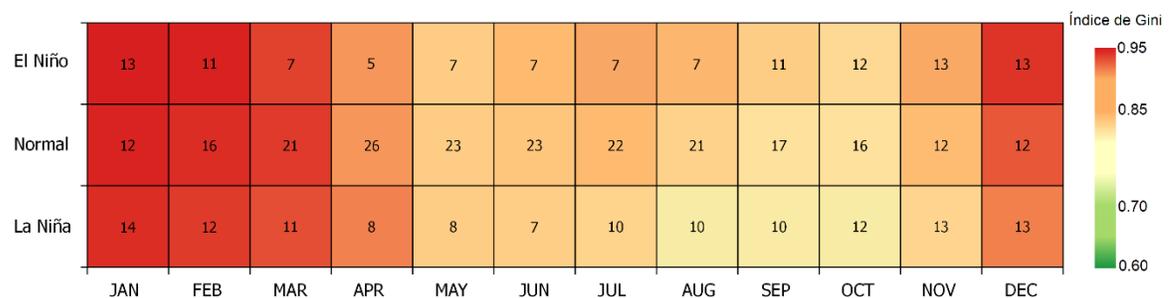


Figura 4.33: Ciclo anual región Caribe con influencia del fenómeno ENSO.

- Región Orinoquía

En la región Orinoquía (**Figura 4.34**), la variación anual de la concentración de la precipitación se hace más evidente. Entre el mes de enero y el mes de junio, en condiciones normales, el Índice de Gini disminuyó en 0.27 lo que marca precipitaciones con mayor distribución a lo largo del mes.

El ciclo anual para esta región es unimodal con una primera temporada entre los meses de abril y octubre entre los cuales, las precipitaciones más distribuidas de presentan entre mayo y julio. La segunda temporada se da para los meses de noviembre a marzo, con los índices más altos sobre el mes de enero.

Para la fase El Niño del fenómeno ENSO, el efecto más fuerte sobre la concentración se presenta en el mes de junio donde, respecto a las condiciones normales, el Índice de Gini aumenta en 0.028. Para La Niña, la mayor variación respecto a las condiciones normales se da en enero para el cual disminuye la concentración de la precipitación cuando se presenta esta fase extrema del fenómeno.

En general, es posible concluir que dentro de la región Orinoquía, para la determinación de la concentración de la precipitación, tiene más peso el efecto propio del ciclo anual que los cambios que se puedan generar cuando se presentan las fases extremas del fenómeno ENSO. Esto puede evidenciarse en los cambios del Índice de Gini que, para una misma fase, pueden ser del orden del 30% entre un mes y otro, mientras que, entre fases, las diferencias más grandes no superan el 5%.

El valor del Índice de Gini para el ciclo anual de la concentración de la precipitación en la región Orinoquía, varía entre 0.65 a 0.93.

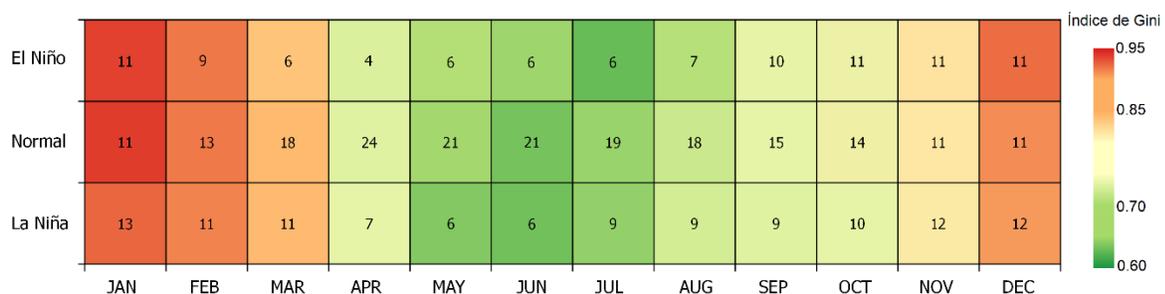


Figura 4.34: Ciclo anual región Orinoquía con influencia del fenómeno ENSO.

- Región Pacífico

Sobre la región Pacífico, el efecto del fenómeno La Niña es el de aumentar la distribución de la precipitación en cada mes. De esta forma, el valor más bajo del Índice de Gini presentado para esta región (0.63), se da sobre el mes de junio cuando durante la ocurrencia de dicho fenómeno. Un Índice de Gini de 0.63 indica que el 5% de los días de lluvia aporta el 24% del total de precipitación que se presenta en el mes.

La **Figura 4.35** no muestra un ciclo anual definido sobre la región Pacífico, sin embargo, las concentraciones más altas sobre esta región se presentan en los meses de enero y febrero, alcanzando un índice de 0.77 cuando se tiene la influencia de El Niño sobre la región. Los demás meses, presentan precipitaciones distribuidas, con Índice de Gini que no supera el valor de 0.7.

Al igual que en las regiones presentadas anteriormente, la cantidad promedio de meses registrados en las fases extremas del fenómeno ENSO es similar, mientras que la mayor cantidad de meses presentan condiciones normales.

El valor del Índice de Gini para el ciclo anual de la concentración de la precipitación en la región Pacífico, varía entre 0.63 a 0.77.

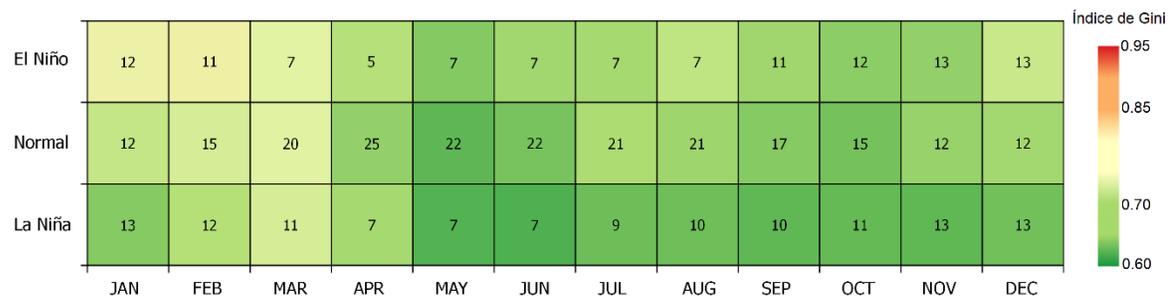


Figura 4.35: Ciclo anual región Pacífico con influencia del fenómeno ENSO.

4.4 Influencia de los días sin precipitación en el cálculo de la concentración

En el presente estudio, realizado sobre la concentración de la precipitación diaria en Colombia, se incluyeron dentro del cálculo del Índice de Gini, los días que no presentaron precipitación de forma que las series de lluvia tenían valores de cero. Sin embargo, con el fin de evaluar el efecto que tienen los ceros sobre el índice, en este aparte se presentan

los resultados de un ejercicio en el cual, el Índice de Gini fue calculado para las estaciones del IDEAM incluyendo los días sin precipitación y sin incluirlos.

Como resultado de este ejercicio, se observa que al incluir los ceros el Índice de Gini de cada estación aumenta entre el 5% y el 64% de su valor. La estación La Pastora, localizada en las sabanas del Caribe, tiene un Índice de Gini de 0.33 si se utiliza la serie de precipitaciones para la cual no se incluyen los ceros, mientras que al incluirlos ceros el Índice de Gini aumenta a 0.90. En el primer escenario, el 10% de los días de lluvia aporta el 24% de la precipitación registrada mientras que, para el segundo escenario, el 10% de los días de lluvia aporta el 93% de la precipitación total. Esta estación cuenta con 8000 registros de precipitación de los cuales 6850 son ceros (85.6% del total). La Figura 4.37 muestra el histograma de frecuencias de las diferencias entre los índices calculados utilizando los días sin precipitación y utilizándolos. La media y la mediana de los residuales es de 0.27 con lo que se puede apreciar que estas diferencias siguen una distribución normal.

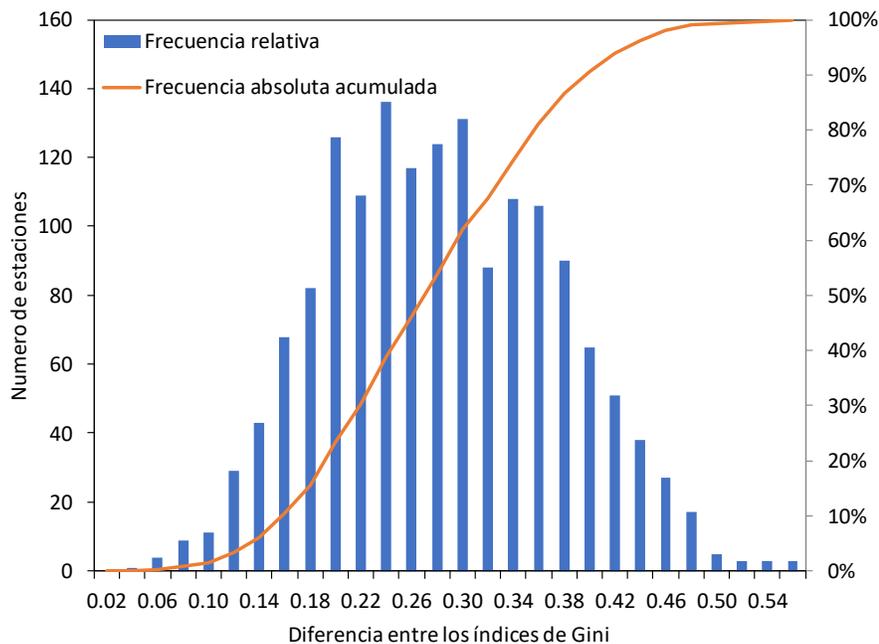


Figura 4.36: Histograma de frecuencias de las diferencias entre los índices calculados con ceros y sin ceros.

Por otro lado, la estación Junín, ubicada sobre el nudo de los pastos en la región Andina, tiene un Índice de Gini de 0.48 cuando no se incluyen los días de precipitación en su cálculo

y un índice de 0.5 cuando si son considerados. Esta estación cuenta con 17457 registros de los cuales el 5.1% (888 registros) son ceros.

La Figura 4.37 muestra, por regiones, el comportamiento del Índice de Gini calculado con series de precipitación sin ceros (derecha) y con ceros (izquierda) en el registro total. Los resultados indican que cuando no se consideran los ceros, el Índice de Gini se presenta similar para todas las regiones naturales y con valores bajos que, considerando los valores extremos, no superan un índice de 0.80.

El Índice de Gini, cuando se calcula sin considerar los días sin precipitación, puede ser interpretado como la “agresividad” que presentan las precipitaciones de algunos pocos días, que en comparación con los demás días donde se presentan lluvias, tienen unas láminas de agua mucho mayores, es decir, las intensidades de precipitación son más fuertes.

Al considerar los días sin precipitación dentro del cálculo del índice, se hacen más evidentes las diferencias entre las regiones naturales respecto a la concentración de la precipitación. Se marca la región Caribe como la región donde las lluvias se concentran en unos pocos días mientras que la región Pacífico se muestra como la región con las mayores variaciones en el índice.

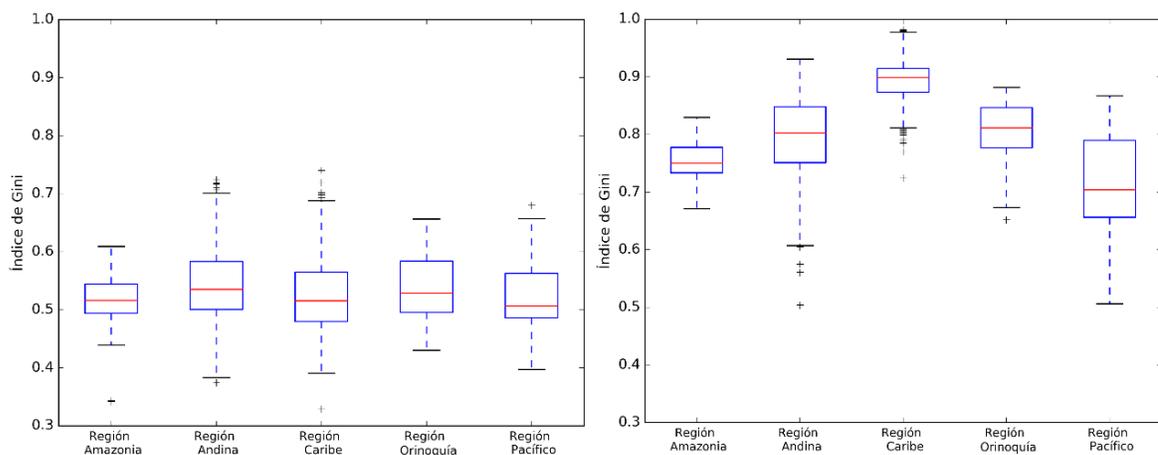


Figura 4.37: Diagrama de caja para el índice de Gini por Regiones sin considerar los días sin precipitación (derecha) y considerando los días con precipitación (izquierda).

La Figura 4.38 muestra el histograma de frecuencias del Índice de Gini obtenido al utilizar los datos de precipitación de las estaciones del IDEAM sin tener en cuenta los datos de cero (arriba) y teniendo en cuenta los mismos (abajo). Los resultados del Índice de Gini

cuando no se consideran los días de precipitación cero, tienen un valor medio de 0.54, una mediana de 0.53 y un coeficiente de asimetría de 0.39. La distribución de estos datos, según los resultados obtenidos, parece ser asimétrica sesgada hacia la derecha.

Por otro lado, los resultados del índice calculados con los datos en cero, cuentan con un valor medio de 0.81, una mediana de 0.82 y un coeficiente de asimetría de -0.40. La distribución de estos datos, según los resultados obtenidos, parece ser asimétrica sesgada hacia la izquierda.

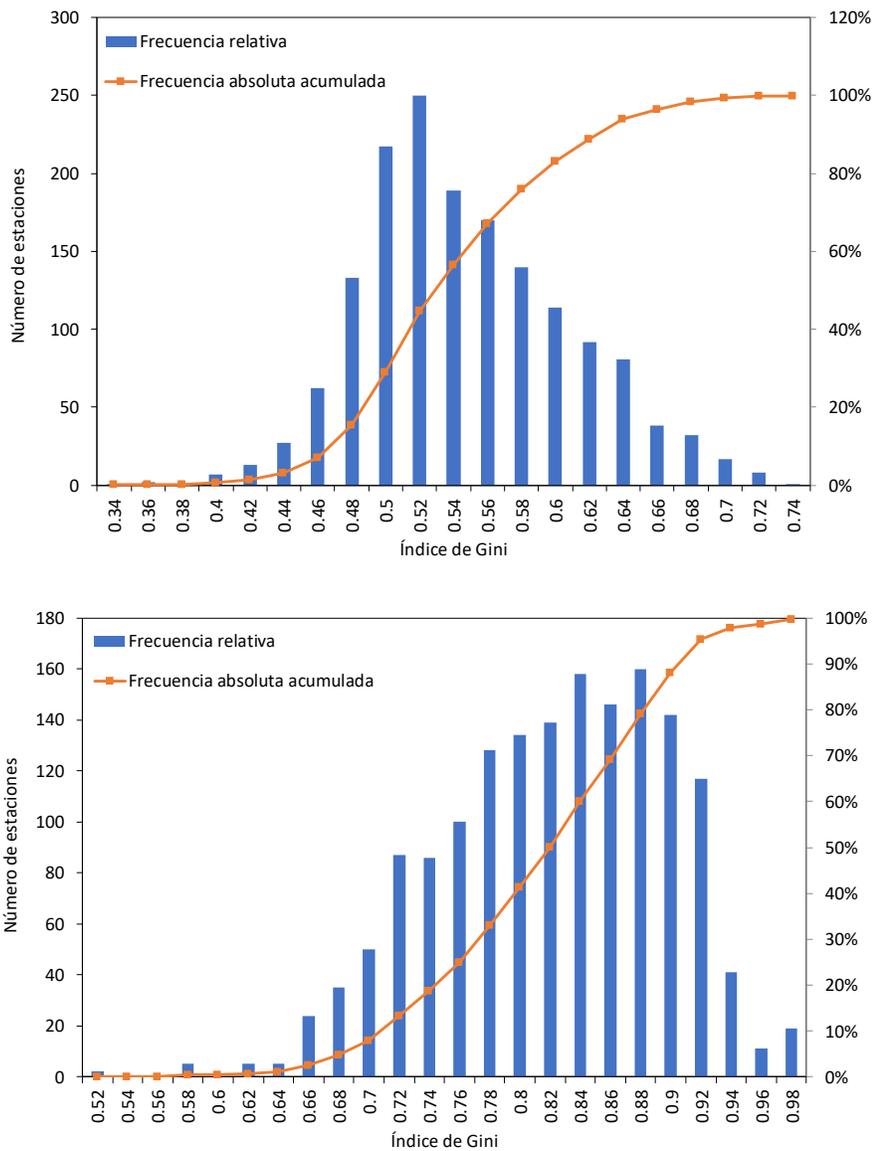


Figura 4.38: Histograma de frecuencias del Índice de Gini con datos IDEAM sin considerar días sin precipitación (arriba) y considerando los días sin precipitación (abajo).

Del análisis realizado sobre la influencia de los ceros en el cálculo del Índice de Gini se concluye que, al no incluirlos, lo que el índice está expresando es la intensidad o “agresividad” de las precipitaciones diarias en la zona para la cual se está realizando el estudio ya que, con este índice, se estaría comparando el aporte al total de precipitación realizado por los días lluvias muy intensas respecto a los días de lluvias de intensidad baja. Para Colombia, se observa que, en todas las regiones naturales, la influencia de estos días en el total pluviométrico de cada zona es similar y que no se encuentran regiones que se caractericen por precipitaciones muy agresivas.

Al incluir los ceros en los cálculos realizados, se determina como se distribuye dentro de un periodo de estudio la precipitación. Es decir, si se está evaluando la información de precipitación diaria de un año, según el resultado del índice de Gini es posible saber, de los 365 días, cuantos aportan a la precipitación total de ese periodo. De esta manera, se observa en los resultados que, para Colombia, la península de la Guajira, por ejemplo, es de las zonas donde muy pocos días aportan al total de la precipitación que se presenta en el lugar y, que para la región Pacífico, por otro lado, los días de precipitación tienen una mejor distribución dentro del periodo estudiado.

5. Conclusiones

En este trabajo se realizó un análisis sobre el comportamiento espacial y temporal de la concentración de la precipitación en Colombia mediante la estimación del Índice de Gini y el Índice de Concentración calculados con información de precipitación diaria del IDEAM, y el Índice de Fournier, Índice Modificado de Fournier e Índice de Concentración de la Precipitación con información de precipitación mensual.

Los resultados del Índice de Gini y el Índice de Concentración indican que en la parte norte de la región Caribe y en las zonas montañosas, se presentan las precipitaciones más concentradas, lo que revela el hecho de que pocos días lluviosos aportan un elevado porcentaje de la precipitación. Sobre la región Pacífico las precipitaciones se muestran como las más distribuidas del territorio colombiano presentándose el caso de que el 10% del total de días registrados aporta el 33% de la precipitación total.

El Índice de Concentración de la Precipitación calculado para cada sitio muestra que en el territorio colombiano predominan las precipitaciones estacionales moderadas principalmente sobre la región Andina. El 72% de las series estudiadas muestra este comportamiento lo que corresponde a un total de 1151 series de precipitación de las cuales 880 (76%), están localizadas sobre dicha región. La estacionalidad de las precipitaciones aumenta a medida que aumenta la latitud. En la región Caribe, existen 59 estaciones meteorológicas para las cuales, según el Índice de Concentración de la Precipitación, las precipitaciones tienen un comportamiento fuertemente estacional con una diferencia apreciable entre los periodos de lluvia y los periodos secos.

El Índice de Fournier y el Índice Modificado de Fournier indican la agresividad de las precipitaciones en términos del volumen de agua que estas producen. Estos índices fueron calculados año a año para cada sitio. El resultado presentado es el valor medio de los índices obtenidos para cada año.

Sobre las regiones Amazonía, Orinoquía y Pacífico y algunas zonas de la región Andina y la región Caribe, según los resultados del Índice de Fournier, que relaciona la precipitación el mes más lluvioso del año con la precipitación total anual, las precipitaciones se clasifican como de agresividad alta. Por otro lado, en el valle del Cauca, el alto Magdalena, el macizo volcánico, el altiplano cundiboyacense, la vertiente llanera de la cordillera oriental y parte de la montaña santandereana, se localiza una amplia zona para la cual, los valores del Índice de Fournier, indican que la agresividad de las precipitaciones puede clasificarse como baja y moderada. En la región Caribe es posible encontrar también algunos puntos con precipitaciones de agresividad moderada sobre las sabanas del Caribe.

Según los valores obtenidos para el Índice Modificado de Fournier, los sitios con precipitación con agresividad de clasificación alta y muy alta representan el 90% del total de las estaciones de medición de precipitación estudiadas. Un aumento del 20% respecto a las series de precipitación que mostraban una clasificación similar para el Índice de Fournier. Los puntos con lluvias de agresividad baja y moderada pasaron de ser 310 a ser 153.

A partir del Índice de Gini obtenido al utilizar información de CHIRPS v2.0, es posible apreciar que la concentración de la precipitación diaria en Colombia para una escala temporal de largo plazo en el periodo 1981–2016, aumenta desde el oriente al occidente del país hasta llegar al piedemonte llanero, la serranía de La Macarena y el piedemonte amazónico donde se tiene una concentración alta, pasa de 0.66 al oriente a 0.81 en las zonas mencionadas; así mismo, la concentración aumenta hacia el norte donde se presentan los valores más elevados (0.98 en la península de La Guajira). En la costa pacífica, en el departamento de Chocó y en parte del departamento de Antioquia se presentan las distribuciones de precipitación más uniformes dentro del país.

Los valores encontrados para el Índice de Concentración propuesto por Martín-Vide (2004), quien propuso una modificación para el cálculo de las curvas de Lorenz, no difieren mucho de los encontrados utilizando el Índice de Gini. El error absoluto entre estos dos índices no supera el 5%. En el estudio realizado por Monjo y Martín-Vide (2016), se concluye también que ambos índices son, para fines prácticos, son indistinguibles, al menos para la precipitación diaria.

No se evidencia una relación clara entre la concentración de la precipitación, determinada con el Índice de Gini, el Índice de Concentración y el Índice de Concentración de la Precipitación con algunas variables geográficas como elevación, longitud y latitud. Lugares con alturas sobre el nivel del mar similar, como las que se pueden encontrar en algunas zonas de la región Caribe y la región Pacífico, presentan concentraciones diferentes. Los resultados para el Índice de Fournier y el Índice Modificado de Fournier, que indican la agresividad de la precipitación, tampoco presentan relación con las variables geográficas.

Los sitios para los que el Índice de Gini calculado año a año muestran una tendencia positiva significativa con un nivel de confianza del 90% se localizan en la región Andina sobre el Alto Magdalena, el Valle del Cauca, el altiplano Cundiboyacense y la vertiente llanera de la cordillera oriental. En la región Caribe, se observan tendencias positivas sobre la depresión Momposina y los valles de los ríos Sinú y San Jorge. Para la región Orinoquía los aumentos en la concentración se dan sobre la llanura del río Meta y el piedemonte llanero, y para la región Pacífico se encuentran en las llanuras costeras del Pacífico. Las estaciones para las que el Índice de Gini ha disminuido en el tiempo se ubican en la cordillera central meridional, la montaña Antioqueña y el Magdalena medio en la región Andina y los valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan en el Pacífico.

La tendencia positiva del Índice de Concentración de la Precipitación se concentra en el altiplano Cundiboyacense, el alto Magdalena, el altiplano de Popayán y en cercanías a la Ciénaga Grande de Santa Marta. Mientras que los Índices de Concentración de la Precipitación con tendencia negativa, se sitúan a todo lo largo de la región Caribe con mayor presencia en la depresión Momposina. El número de estaciones meteorológicas con tendencia negativa para un nivel de confianza del 90% es mayor que aquellas con tendencia positiva (184 vs. 130).

Las estaciones con tendencia positiva para el Índice de Fournier son 146, lo que representa el 9.14% del total estudiado. El Índice Modificado de Fournier al mismo nivel de confianza, muestra un aumento en las estaciones para las cuales la tendencia es positiva (231 estaciones, 14.5% de las estaciones totales). Dicho aumento se ve reflejado en el altiplano Cundiboyacense, macizo volcánico, alto Magdalena, macizo de Santurbán, región Caribe en general y valles aluviales de los ríos Atrato y San Juan.

El 24.86% de las estaciones muestra una tendencia positiva al 90% de nivel de confianza (397 estaciones) para los días de precipitación al año. Estas estaciones se distribuyen a lo

largo del territorio colombiano con 273 estaciones en la región Andina, 26% del total de estaciones emplazadas en esta región; 78 estaciones sobre la región Caribe, 22.3% de las estaciones que se tienen en esta región, 18 estaciones en la región Amazonia que corresponden al 25% del total de estaciones que están en esta región, 16 estaciones en la región Orinoquía que representan el 24% de las estaciones de esta zona y 12 estaciones en la región Pacífico que equivalen al 19.6%.

El efecto del ciclo anual se hace evidente en el aumento o disminución del Índice de Gini según la temporada para la que fue calculado. El Índice de Gini para la temporada húmeda en los sitios con régimen de precipitación unimodal, ubicados en las regiones Amazonía, Orinoquía, el costado oriental de la región Andina, la región Pacífico y la parte sur de la región Caribe, varía entre 0.61 y 0.82, con las lluvias más concentradas localizadas en la península de La Guajira, sobre el alto Magdalena y sobre el macizo de Santurbán y el Catatumbo. El valor más bajo del Índice de Gini, se presenta sobre la región Andina en el sector nororiental de la cordillera occidental. La temporada seca muestra para los sitios con régimen de precipitación unimodal, un aumento en el Índice de Gini alcanzando valores que oscilan entre 0.65 y 0.9.

El Índice de Gini en parte de la región Andina y al norte de la región Caribe donde se presenta ciclo anual bimodal, aumenta hacia el norte para las 4 temporadas estudiadas. La primera temporada húmeda se caracteriza por precipitaciones más distribuidas que las que se dan en la segunda temporada húmeda. Por otro lado, entre la primera y la segunda temporada seca, también se presenta una diferencia respecto al comportamiento de la concentración de la precipitación, teniendo las precipitaciones más concentradas durante la primera temporada seca.

Las fases extremas del fenómeno ENSO afectan con mayor intensidad los resultados del Índice de Gini sobre las regiones Andina y Pacífico. Dentro de la región Orinoquía. El resultado del Índice de Gini indica que tiene más peso el efecto propio del ciclo anual que los cambios que se puedan generar cuando se presentan las fases extremas del fenómeno ENSO. Así mismo, las regiones Amazonía y Caribe no muestran variaciones importantes en el valor del índice cuando se presentan dichas fases.

En la zona norte de la región Caribe sobre la península de la Guajira, los valores del Índice de Gini, calculado sin tener en cuenta los días sin precipitación, son similares a los

presentados por Sarricolea y Martín-Vide (2005) en el estudio realizado en Chile para el cual, las zonas desérticas presentan índices de concentración bajos debido a las bajas precipitaciones anuales que se presentan en dichas regiones. Resultados similares se presentan también en los estudios realizados por Sánchez y Martín-Vide (2006) sobre la Península Ibérica.

6. Referencias

- Ananthakrishnan, R., Soman, M. (1989). Statistical distribution of daily rainfall and its association with the coefficient of variation of rainfall series. *International Journal of Climatology*, 9, 485-500. doi:10.1002/joc.3370090504
- Apaydyn, H., Erpul, G., Bayramin, I., Gabriels, D. (2006). Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology*, 328, 726-732. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.01.019
- Arnoldus, H. M. (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: *De Boodt, M., Gabriels, D. (eds.), Assessment of Erosion. John Wiley and Sons, Chichester*, 127-132.
- Benhamrouche, A., Martín-Vide, J. (2011). Distribución espacial de la concentración diaria de la precipitación en la provincia de Alicante. *Investigaciones geográficas*, 56, 11-129.
- Benhamrouche, A., Martín-Vide, J. (2012). Avances metodológicos en el análisis de la concentración diaria de la precipitación en la España peninsular. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 32. doi:10.5209/rev_AGUC.2012.v32.n1.39306
- Benhamrouche, A., Bpucherf, D., Hamadache, R., Bendahmane, L., Martín-Vide, J., Teixeira Nery, J. (2015). Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Algeria. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15, 617-625. doi:10.5194/nhess-15-617-2015
- Caloiero, T. (2014). Analysis of daily rainfall concentration in New Zealand. *Natural Hazards*, 72, 389-404. doi:10.1007/s11069-013-1015-1
- Carmona, A. M., Poveda, G. (2014). Detection of longterm trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through empirical mode decomposition. *Climatic change*, 123, 301-313.
- Coscarelli, R., Caloiero, T. (2012). Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). *Journal of Hydrology*, 416-417, 145-156. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.047

- Echeverri Tafur, L., Obando Moncayo, F. H. (n.d.). Erosividad de las lluvias en la región centro-sur del departamento de Caldas, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 63.
- Espinoza, P. S., Martín-Vide, J. (2005). Distribución espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante un índice de concentración a resolución de 1 mm, entre 1965-2005. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8.
- Fournier, F. (1960). Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. *Presses universitaires de France*.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Hoell, A. e. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. *Climate Hazards Group*, 2, 150066.
- Gibbs, J. P., Martin, W. T. (1962). Urbanization, technology, and the division of labor: International patterns. *American sociological review*, 667-677.
- Gregori, E., Andrenelli, M. C., Zorn, G. (2006). Assessment and classification of climatic aggressiveness with regard to slope instability phenomena connected to hydrological and morphological processes. *Journal of hydrology*, 329, 489-499.
- Guio-Martínez, V. H. (2015). Determinación y mapificación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del embalse La Copa, Boyacá. *Ingenio Magno*, 6, 34-36.
- Hamed, K., Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *Journal of Hydrology*, 204, 182-196.
- Iskander, S. M., Rajib, M. A., Rahman, M. M. (2014). Trending Regional Precipitation Distribution and Intensity: Use of Climatic Indices. *Atmospheric and Climate Sciences*, 04, 385-393. doi:10.4236/acs.2014.43038
- Jolliffe, I. T., Hope, P. (1996). Representation of daily rainfall distributions using normalized rainfall curves. *International Journal of Climatology*, 16, 1157-1163. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199610)16:10<1157::AID-JOC71>3.0.CO;2-R
- Kendall, M. G. (1955). Rank correlation methods. *British Journal of Statistical Psychology*, 9.
- Li, H., Zhai, P., Lu, E., Zhao, W., Chen, Y., Wang, H. (2017). Changes in temporal concentration property of summer precipitation in China during 1961-2010 based on a new index. *Journal of Meteorological Research*, 31, 336-349. doi:10.1007/s13351-017-6020-y
- Li, X., Jiang, F., Li, L., Wang, G. (2011). Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 31, 1679-1693. doi:10.1002/joc.2181
- Lince, L., Castro, A. (2015). Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Revista Cenicafé*, 25-31.

- Lobo, D., Cortez, A., Rodríguez, M. F., Ovalles, F., Rey, J. C., Gabriels, D., Parra, R. M. (2010). Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. i. Región de los llanos. *Bioagro*, 22, 169-176.
- López, J., Vicente, S., Angulo, M. B., Kenawy, A. (2010). Trends in daily precipitation on the northeastern iberian peninsula, 1955-2006. *International journal of Climatology*, 30, 1026-1041.
- Luis, M., González-Hidalgo, J., Brunetti, M., Longares, L. (2011). Precipitation concentration changes in Spain 1946-2005. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11, 1259-1265. doi:10.5194/nhess-11-1259-2011
- Mandapaka, P. V., Qin, X., Lo, E. Y. (2017). Analysis of spatial patterns of daily precipitation and wet spell extremes in southeast Asia. *International Journal of Climatology*, 37, 1161-1179. doi:10.1002/joc.5073
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- Martin-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, 24, 959-971.
- Medina, F. (2001). *Consideraciones sobre el Índice de Gini para medir la concentración del ingreso*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Mesa, Ó. J., Poveda, G., Vélez, J. I., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Mantilla, R., Montoya, M. I. (2000). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. In: *XIV Seminario de Hidráulica e Hidrología, 7-9 de septiembre, Villa de Leyva, Boyacá*. .
- Monjo, R., Martin-Vide, J. (2016). Daily precipitation concentration around the world according to several indices. *International Journal of Climatology*, 36, 3828-3838. doi:10.1002/joc.4596
- Olascoaga, M. (1950). Some Aspects of Argentine Rainfall. *Tellus*, 2, 312-318. doi:10.1111/j.2153-3490.1950.tb00341.x.
- Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *The Professional Geographer*, 32, 300-309. doi:10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x.
- Patel, N., Shete, D. (2015). Analyzing Precipitation Using Concentration Indices for North Gujarat Agro Climatic Zone, India. *Aquatic Procedia*, 4, 917-924. doi:10.1016/j.aqpro.2015.01.115
- Royé, D., Martin-Vide, J. (2017). Concentration of daily precipitation in the contiguous United States. *Atmospheric Research*, 196, 237-247. doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.011

- Sánchez-Lorenzo A y Martín-Vide J (2006). Distribución espacial de la concentración pluviométrica diaria en la Península Ibérica Proceedings 5º Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, sesión Climatología y Cambio Climático.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American statistical association*, 63, 1379-1389.
- Shi, W., Yu, X., Liao, W., Wang, Y., Jia, B. (2013). Spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in the Lancang river basin, China. *Journal of hydrology*, 495, 197-207.
- Suhaila, J., Jemain, A. A. (2012). Spatial analysis of daily rainfall intensity and concentration index in Peninsular Malaysia. *Theoretical and Applied Climatology*, 108, 235-245. doi:10.1007/s00704-011-0529-2
- Urrea, V., Ochoa, A., Mesa, O. (2017). Variabilidad espacial y temporal del ciclo anual de lluvia en Colombia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Valdés, R., Pizarro, R., Valdés, J. B., Carrasco, J. F., García-Chevesich, P., Olivares, C. (2016). Spatio-temporal trends of precipitation, its aggressiveness and concentration, along the Pacific coast of South America. *Hydrological Sciences Journal*, 2110 - 2132.
- Yesilirmak, E., Atatanir, L. (2016). Spatio temporal variability of precipitation concentration in western Turkey. *Natural Hazards*, 81, 687-704. doi:10.1007/s11069-015-2102-2