

Análisis temporal y espacial de las lluvias en el Área Metropolitana de San Salvador

Orellana, P. ORCID: 0009-0001-6704-1304; Renderos, A.

Gerencia de Hidrología. Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.

porellana@ambiente.gob.sv, grenderos@ambiente.gob.sv

Resumen – Se examinan las series temporales de precipitación que fueron calculadas a partir de los datos de las estaciones de la red de monitoreo del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales ubicadas en el Área Metropolitana de San Salvador durante la estación lluviosa entre los años 2010 y 2022; para contribuir al conocimiento sobre la variabilidad climática en contextos urbanos en El Salvador y para mejorar de los sistemas de alerta temprana por inundaciones. La metodología aplicada en la captura, procesamiento y análisis estadístico de los datos, permitió identificar patrones significativos en la distribución temporal y espacial de la precipitación. Los resultados revelan: (i) una marcada tendencia hacia la ocurrencia de lluvias de corta duración que acumulan la mayor cantidad de precipitación en el primer cuartil, con duración de lluvia menor o igual a 4 horas; (ii) que los valores máximos de precipitación acumulada y horas de lluvia no consecutivas se registran a mayores altitudes y; (iii) que la mayor cantidad de impactos hidrológicos se registran en la proximidad a las cuencas del río Acelhuate y Tomayate.

Palabras clave: Precipitación, Huff, AMSS, tendencias climáticas, impactos hidrológicos.

Abstract – To contribute to El Salvador climate variability knowledge in urban contexts and to the improvement of floodings early warning systems, time series of precipitation were created based on data capture by the monitoring network stations located in AMSS, during the rainy season between 2010 and 2022. The methodology applied in the capture, processing and statistical analysis of the data allowed the identification of significant patterns in the temporal and spatial distribution of precipitation. The results reveal: (i) a marked trend towards the occurrence of short-duration rains that accumulate the greatest amount of precipitation in the first quartile, with rain duration less than or equal to 3 hours; (ii) that the maximum values of accumulated precipitation and non-consecutive hours of rain are recorded at higher altitudes and (iii) that the greatest number of hydrological impacts were in proximity to the Acelhuate and Tomayate river basins.

Keywords: Precipitation, Huff curves, AMSS, climate trends, hydrological impacts.

I. INTRODUCCIÓN.

El estudio de las variables climáticas, como la precipitación, en entornos urbanos desempeña un papel crucial en nuestra comprensión de las amenazas naturales y los impactos que generan, entre ellos, las crecidas repentinas y desbordamiento de ríos (Blenkinsop, y otros 2016). La variabilidad climática, exacerbada por el cambio climático, está asociada con fenómenos meteorológicos que producen impactos en el país (MARN 2017). En este contexto, el presente documento se centra en un análisis de la precipitación en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) a partir de series de datos disponibles para comprender su comportamiento temporal y espacial. Lo anterior permite identificar patrones, tendencias y anomalías que contribuyan a la comprensión de la variabilidad climática en la zona urbana. La importancia del área definida para el estudio radica en su exposición y vulnerabilidad ante amenazas hidrometeorológicas recurrentes que generan impactos a mayor escala (OPAMSS 2016).

II. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). El AMSS está compuesto por 14 distritos ubicados en los departamentos de San Salvador y La Libertad.

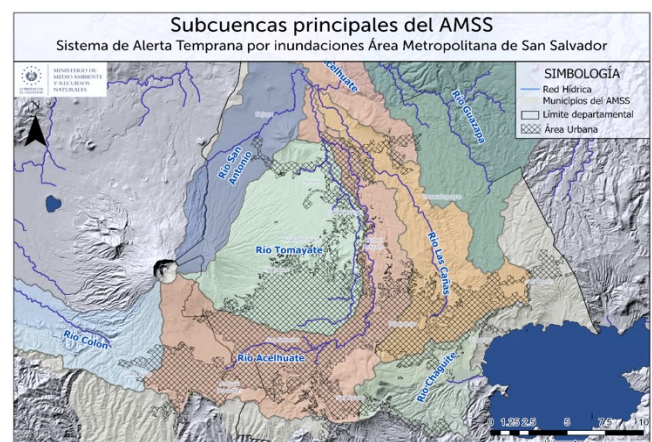


Fig. 1. Zona de estudio e hidrografía.

A. Hidrografía.

La red hídrica del AMSS se encuentra conformada por ríos de respuesta rápida de corto recorrido y por quebradas, algunas de ellas estacionales.

La cuenca del río Acelhuate es la más representativa del AMSS y en ella se han registrado una cantidad significativa de impactos hidrológicos. La figura 1 muestra que las cuencas del río Acelhuate y del río Tomayate, son las que cuentan, dentro del AMSS, con mayor porcentaje de suelo urbanizado.

B. Red telemétrica.

La Dirección de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador DOA, cuenta con un sistema de alerta temprana por inundaciones (SAT) en el que, diferentes estaciones telemétricas han sido ubicadas en el AMSS en las últimas dos décadas. Esta red es denominada "Red Telemétrica de Monitoreo Hidrometeorológico", las estaciones que la conforman se clasifican según los parámetros que registran en:

- Hidrométricas: capturan valores de nivel en ríos y precipitación, cada 5 a 15 minutos.
- Meteorológicas: capturan a cada 10 minutos, valores de diferentes parámetros entre ellos precipitación, temperatura ambiente, presión atmosférica.
- Pluviométricas: capturan únicamente precipitación, en rangos que varían entre 5 y 15 minutos.

Esta red de estaciones (fig. 2), representan los sitios de captura de datos de precipitación, a través de sensores tipo "tippin bucket".

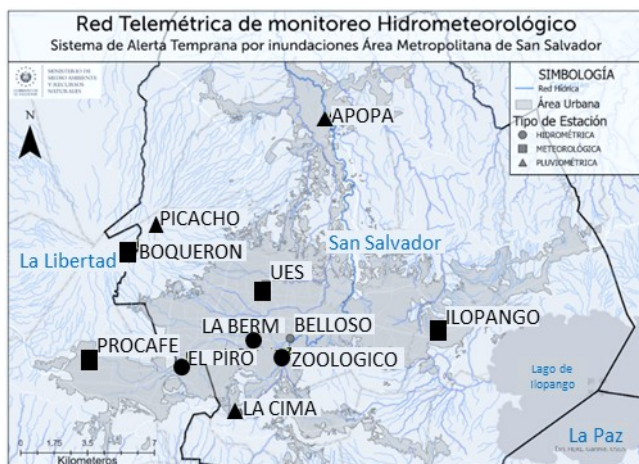


Fig. 2. Red telemétrica del AMSS.

C. Amenazas Hidrológicas

Según el protocolo interno "Monitoreo Hidrológico de Impactos por Inundaciones" (G. A. Renderos 2020). Las amenazas hidrológicas en el AMSS, se clasifican en:

- Inundaciones fluviales: desbordamientos y crecidas repentinas en ríos y quebradas, debido al aumento de escorrentía superficial.
- Inundaciones pluviales: principalmente inundaciones urbanas, debido al colapso de la red de drenaje. Además de los anegamientos de terrenos rurales, poco frecuentes, por saturación de suelos.

El Centro de Pronóstico Hidrológico (CPH) en el catálogo cualitativo de impactos hidrológicos, realiza un conteo y registro de los impactos asociados a las amenazas hidrológicas.

III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

La descripción de la metodología considera el filtrado y procesamiento de datos horarios, la construcción de series temporales y los criterios aplicados en el análisis temporal y espacial (fig. 3).

A. Filtrado de datos de la Red Telemétrica.

La base de datos de la unidad de Hidrología de DOA, almacena las series los registros de las estaciones telemétricas. En este análisis, se filtró el parámetro de precipitación acumulada (PC) para las estaciones ubicadas en el AMSS, capturados con pluviómetros Stainless Steel marca Sutron. PC, corresponde al registro de precipitación acumulada por incrementos de tiempo.

B. Procesamiento de Datos Horarios.

Las series subsidiarias de lluvia constituyen una herramienta útil en el estudio de crecidas repentinas e inundaciones en zonas urbanas. De manera que se realizó un tratamiento y conversión de datos sub horarios a horarios. Dicho proceso integra cinco subprocesos minutales y seis subprocesos horarios.

Los criterios de tratamiento de los datos horarios aplicados, se fundamentan en la metodología para estandarizar el procesamiento de datos minutales a series horarias de DOA, la cual consideró en su creación en el año 2022 lo propuesto por Blenkinsop y otros (2016). Los criterios aplicados se clasificaron en:

- **Criterios rígidos o duros:** aquellos filtros o criterios que obligatoriamente deben cumplirse.
- **Criterios blandos:** aquellos filtros o criterios que, en caso de cumplirse, requieren ser

revisados a detalle por el usuario de los datos, según el objetivo del estudio a realizar.

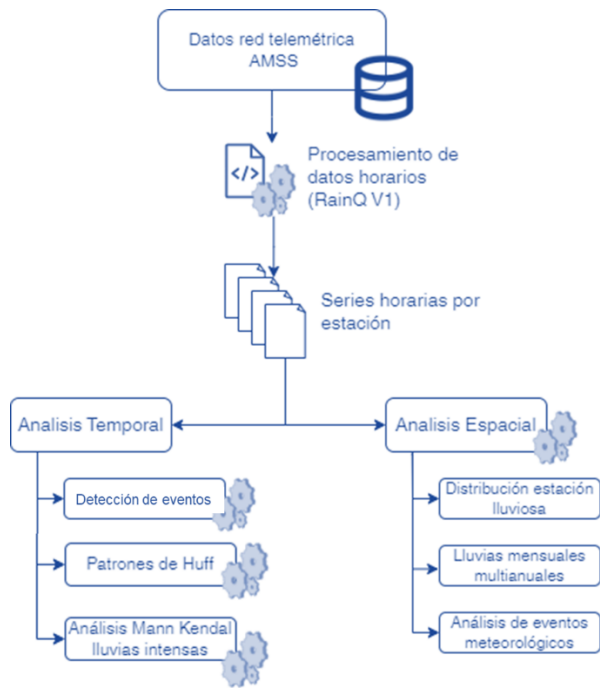


Fig 3. Procesos generales realizados por el estudio.

Las tablas 1 y 2 detallan cada uno de los sub-procedimientos realizados por RainQ V 1.2, herramienta construida para estandarizar el procesamiento de datos a series horarias que fue desarrollada en el lenguaje MATLAB (A. Renderos 2022).

TABLA 1
Procesos sub-horarios realizados por RainQ V1.2

Proceso	Descripción	Tratamiento sobre los datos
Qm0	Se crea serie temporal 5 minatural	Ninguno
Qm1	Se eliminan datos negativos	Aplicación de criterio rígido.
Qm2	Agregación a escala temporal definida.	Suma de datos ascendente.
Qm3	Comparación de vecinos próximos	Relleno de datos
Qm4	Transformación a valores de intensidades, elimina datos negativos y valores que superan los 5mm/min.	Transformación del significado del valor. Aplicación de Criterio rígido.

La figura 4 muestra gráficos que representan visualmente la calidad de los datos horarios obtenidos. El procesamiento de estos datos resulta en la generación de un archivo en formato .CSV, el cual incluye tres columnas: 'Tiempo' (con fecha y hora), 'Valor Horario' (que representa la suma por hora) y 'Clasificación de Calidad del Dato'. La Tabla 3 detalla las definiciones para las categorías de calidad de los datos de precipitación horaria.

TABLA 2

PROCESOS HORARIOS REALIZADOS POR RAINQ V1.2

Proceso	Descripción	Tratamiento sobre los datos
Qh0	Agregación a datos horarios solo si se cumple el % de datos faltantes permitidos en una hora.	Suma de datos ascendentes. Aplicación de criterio rígido.
Qh1	Clasifica y/o elimina el valor horario según umbrales horarios de lluvia acumulada para eventos de 100 y 25 años de periodo de retorno.	Aplicación de criterios rígidos y blandos.
Qh2	Clasifica y/o elimina el valor según el criterio de acumulado en meses de la estación seca. Según el umbral del 80% de la lluvia horaria para 25 años de periodo de retorno.	Aplicación de criterios rígidos y blandos.
Qh3	Clasifica valores repetitivos de acumulados bajos de lluvia durante meses de la estación seca.	Aplicación de criterios blandos.
Qh4	Clasifica valores horarios si cumplen con registro consecutivo de no lluvia durante la estación lluviosa.	Aplicación de criterios blandos.
Qh5	Clasifica y/o elimina valores si el acumulado diario supera el umbral de lluvia máxima para un periodo de 24 horas.	Aplicación de criterio rígido.

TABLA 3

Clasificación de la calidad del dato de lluvia horaria, obtenido a través de RainQ V1.2

Categoría	Símbolo	Definición
Bueno (GOOD)	G	Valores horarios que cumplen con todos los criterios rígidos definidos.
Faltante (MISSING)	M	Valores que no cumplen con al menos uno de los criterios rígidos definidos o no contaba con registro en la serie original
Sospechoso (SUSPICIOUS)	S	Valores que no cumplen con al menos uno de los criterios blandos.

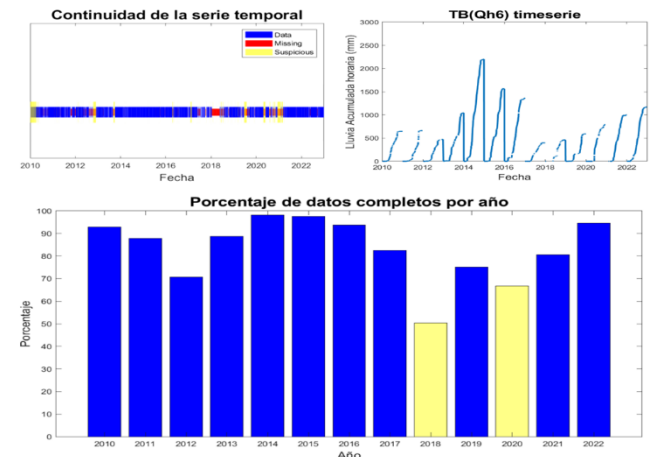


Fig. 4. Gráficos que muestran el estado general de cada una de las estaciones (A. Renderos 2022).

C. Series Horarias por Estación.

El análisis se realiza considerando los registros de mayo a octubre, estación lluviosa, y noviembre, mes de transición, para el período del 2010-2022. A partir de dichos datos y mediante el uso de información adicional, como tiempos de fallo de las estaciones, inicio de operación de las estaciones y con la herramienta RainQ, se generaron las series de datos.

D. Análisis Temporal.

Las series de datos fueron utilizadas para evaluar la densidad estimada de Kernel, detectar eventos de lluvia y evaluar patrones de precipitación.

1) Densidad estimada de Kernel.

Con las series temporales construidas para cada estación, se efectuó un análisis visual mediante la Densidad Estimada de Kernel (KDE). Este enfoque gráfico emplea una curva de densidad probabilística continua para mostrar la distribución de los datos, de manera análoga a un histograma (Waskom, s.f.). El objetivo de este proceso es detectar patrones consistentes en los datos o determinar la necesidad de un análisis más detallado por estación.

2) Detección de eventos de lluvia.

En la etapa de generación de análisis tanto temporal como espacial, se procedió a la identificación de eventos de lluvia en las series temporales procesadas. Para los fines de este estudio, un evento de lluvia se caracteriza por cumplir con dos criterios: (i) registro de precipitación superior a 1 mm, e (ii) intervalo entre eventos consecutivos superior a tres horas. De esta manera, un evento de lluvia o tormenta en este análisis se entiende como:

“un periodo de lluvia continua con acumulados mayores a 1 mm, separado del evento anterior y del posterior por un tiempo igual o mayor a tres horas dentro de las cuales no se supera el umbral de 1 mm acumulado en una hora.”

Se automatizó el proceso para leer los datos de las series de un archivo .CSV, implementando los siguientes pasos:

- Identificación de momentos en los que se registra lluvia. Para ello se examinan los registros horarios y se determina en qué momento la precipitación acumulada es mayor a 1 mm.
- Distinción del inicio y fin de cada evento de lluvia para calcular la duración del evento. Esto se realiza buscando intervalos consecutivos de tiempo durante los cuales se registra lluvia, considerada como lluvia continua.
- Aplicación de filtro de acumulación de lluvia para discriminar aquellos eventos que superan el

umbral mínimo. De tal forma que se registró como eventos de precipitación, aquellos períodos de tiempo durante los cuales la cantidad total de lluvia acumulada es igual o superior a 1 mm. Esto ayuda a eliminar la detección de eventos de lluvia poco significativos o de corta duración y permite enfocar el análisis en aquellos eventos que tienen una mayor influencia en el comportamiento de la escorrentía.

- Cálculo del valor de lluvia acumulada durante cada evento de precipitación, sumando las cantidades de lluvia registradas en cada hora dentro del evento. Además, se guarda la lluvia por hora durante cada evento.

3) Patrones de precipitación.

Con el fin de identificar la existencia de una tendencia al aumento o disminución de eventos de precipitaciones horarias y determinar el comportamiento de las intensidades de las precipitaciones, se generaron patrones de precipitación con la construcción de curvas Huff.

Curvas Huff.

Las curvas de Huff fueron desarrolladas por el hidrólogo estadounidense Floyd A. Huff para caracterizar las distribuciones temporales de la lluvia en un área de interés y relacionar el tiempo con la precipitación.

Huff, desarrolló relaciones de distribución de tiempo para tormentas intensas en un área determinada y encontró que podían representarse mejor relacionando el porcentaje de lluvia de tormenta con el porcentaje de tiempo total de la tormenta (fig. 5), agrupando los datos según el cuartil en el que la lluvia fue más intensa. También descubrió que los efectos individuales de la precipitación media, la duración de la tormenta y otros factores de la tormenta eran pequeños en comparación con estos porcentajes (Huff, 1967).

Según este método, una parte importante de la precipitación ocurre en una pequeña parte de la duración total de la tormenta, independientemente de su duración. Según el momento en el que ocurre la mayor cantidad de precipitación, se propuso una clasificación de las precipitaciones en cuatro grupos:

- Grupo I: si la mayor precipitación se registra entre el inicio de la duración y el primer cuartil.
- Grupo II: si se registra entre el primer cuartil y el segundo cuartil.
- Grupo III: si se registra entre el segundo y tercer cuartil.

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{(\text{Var}(S))^{1/2}} & \text{Se } S > 0 \\ 0 & \text{Se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{(\text{Var}(S))^{1/2}} & \text{Se } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Para que exista un nivel de significancia (α) que permita el rechazo de la hipótesis nula, se espera que el valor absoluto de Z sea mayor que $Z - \alpha/2$. Para el estudio se ha establecido el nivel de significancia del 5%.

Se complementa este estudio con un análisis visual mediante gráficos de promedios multianuales horarios. El estadístico de media aritmética, representando el comportamiento anual, tiende a verse afectado por los valores extremos horarios. Este estadístico facilita la identificación de tendencias de aumentos en los acumulados horarios y el comportamiento de las precipitaciones a lo largo del día.

E. Análisis Espacial.

La distribución espacial de lluvia a escala sub diaria, diaria y estacional, desde el punto de vista hidrológico, apoya la buena gestión del recurso hídrico y contribuye a mejorar el análisis del comportamiento en los cambios extremos de las aguas superficiales. Jones, y otros (2012) han identificado una contribución significativa de los extremos de lluvia diarios y anuales en eventos severos de inundaciones en años recientes en Reino Unido.

Para realizar el análisis espacial que describa el comportamiento de la precipitación durante los meses de la estación lluviosa en los diferentes años, se utilizaron las series de precipitación horarias generadas. Además, de un análisis comparativo entre eventos meteorológicos específicos.

1) Distribución estación lluviosa.

Se realizó el cálculo de lluvia acumulada por estación durante la estación lluviosa por año. Para los cálculos mensuales se estableció un umbral mínimo de datos disponibles del 70%. Si dicho valor era inferior al 70%, entonces el valor calculado se clasificaba como dato faltante y no era considerado en el análisis.

Adicional al valor acumulado, se calculó como indicador el número total de horas lluviosas. Una hora lluviosa (wet hour) es un registro horario que super 1 mm de lluvia.

Posteriormente, se crearon tablas anuales de acumulados y horas de lluvia de cada estación lluviosa y se interpolaron los resultados obtenidos. La interpolación aplicada, utilizó el método Krigging, disponible en los métodos de interpolación del software Surfer.

2) Lluvias mensuales multianuales.

Se realizó el cálculo del promedio mensual de todos los años disponibles en el período de estudio, utilizando los datos mensuales calculados anteriormente. Para una mejor interpretación espacial de los resultados, se utilizó el método Krigging como método de interpolación de cada una de las series.

3) Análisis de eventos meteorológicos.

Con el fin de identificar si existe algún comportamiento en la distribución espacial de lluvia según eventos meteorológicos generadores de lluvias, se han elaborado los mapas para eventos de:

- Sistemas ciclónicos organizados como depresiones tropicales (DT), tormentas tropicales (TT) y huracanes (HC).
- Ondas tropicales (OT) y ondas del este (OE).
- La influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ).

La influencia de vaguadas troposféricas (TUTT) y otros sistemas meteorológicos no fueron analizadas, debido a la poca información existente en el catálogo cualitativo de inundaciones y a la falta de un catálogo de fenómenos meteorológicos.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Análisis Temporal.

1) Densidad estimada de Kernel.

La figura 7, ilustra los gráficos de Densidad Estimada de Kernel (KDE) para las series de datos de cada estación, revelando un patrón general de similitud en el comportamiento de los datos entre las estaciones.

Predominantemente, se observa una mayor concentración de datos con acumulados de lluvia inferiores a 20 mm, manifestándose en una curva con una pendiente inclinada hacia la derecha. Específicamente, la estación Boquerón muestra los valores más bajos en el punto de máxima densidad, mientras que la estación PROCAFE presenta los valores más altos en dicho pico. Además, la estación PROCAFE registra los mínimos valores observados de máximos de lluvia acumulada, contrastando con la estación La Bermeja. En la estación La Bermeja se

obtienen los valores máximos de los picos. Las gráficas KDE subrayan que aún con las variaciones específicas a cada estación, existe entre las series de cada estación una tendencia comportamental coherente que facilita realizar un análisis comparativo.

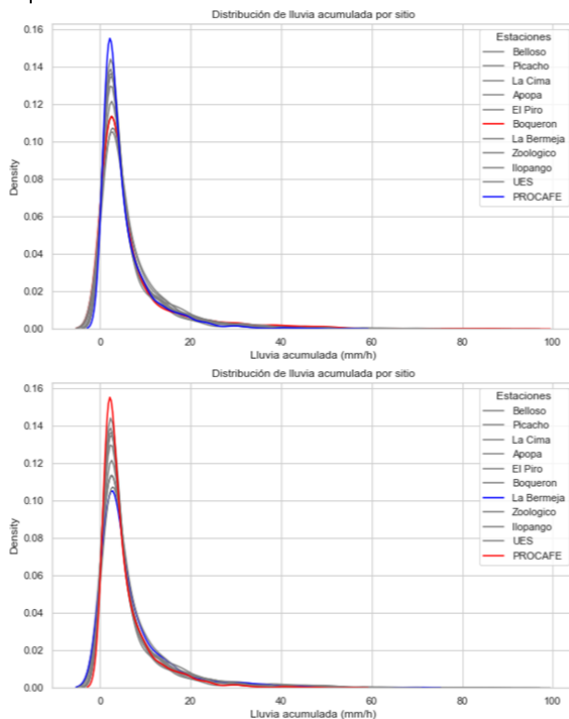


Fig 7. Curvas KDE de las series por estación. (superior) muestran para cada estación las densidades máxima y mínima por acumulado horario. (inferior) Destaca para cada estación los máximos y mínimos en lluvia acumulada máxima registrada.

2) Detección de eventos de lluvia.

Se generó una lista completa de eventos de lluvia para la generación de patrones. Luego cada evento de lluvia detectado se caracterizó por: (i) tiempo de inicio, (ii) tiempo de finalización, (iii) duración, (iv) lluvia total acumulada y (v) lluvia por hora.

Los eventos obtenidos, revelaron una distribución variada de eventos de lluvia a lo largo del período de estudio; eventos de diferentes duraciones y magnitudes, y reflejaron la diversidad de eventos generadores de impactos en el AMSS.

3) Generación de patrones de precipitación.

A partir de las series de eventos construidas se generaron los patrones de precipitación con las curvas Huff. Para ello, se utilizaron los datos de las estaciones, en un área aproximada de 170 km². Los eventos de lluvia identificados anteriormente se utilizaron para realizar la clasificación de los eventos según el tiempo en el que se registra la mayor cantidad de lluvia acumulada. Este enfoque se basa

en la teoría de cuartiles y la clasificación de datos por rangos, que considera:

- Normalización de la duración y el valor de la precipitación horaria de cada evento para facilitar la comparación entre ellos.
- Cálculo de los cuartiles para dividir los eventos de lluvia en cuatro grupos basados en su duración normalizada. El primer cuartil (Q1) representa el valor por debajo del cual se encuentra el 25% de los datos, el segundo cuartil (Q2) es la mediana, el tercer cuartil (Q3) es el valor por debajo del cual se encuentra el 75% de los datos, y el cuarto cuartil es el máximo.
- Asignación de una categoría a cada evento de lluvia según su duración normalizada. La categoría se define en función de la proporción de la acumulación máxima de precipitación en los diferentes cuartiles de la duración que pueden ser 'I', 'II', 'III' o 'IV'. Una vez establecidas las categorías, se compara la duración normalizada de cada evento con los umbrales de los cuartiles.

Este proceso de categorización permite agrupar los eventos de lluvia en función de su duración relativa, lo que proporciona información sobre la distribución y frecuencia de los eventos de lluvia. Estas categorías se utilizaron para generar las curvas de Huff. Se generaron cuatro gráficos con múltiples curvas por estación, uno para cada una de las categorías, tal como se muestra en la figura 8.

Posteriormente, para cada estación, se combinaron las curvas obtenidas para cada clase y luego se trazó la línea más representativa de su comportamiento, obteniendo como resultado un gráfico con cuatro curvas representativas, similar al mostrado en la figura 9.

Se encontró que, para la mayoría de las estaciones, las curvas que corresponden al primer cuartil son más suavizadas. En este cuartil es donde se tuvieron la mayoría de los eventos categorizados, lo cual permite evidenciar que la mayor cantidad de eventos de tormentas que se registran en el AMSS corresponden a eventos con duraciones cortas.

En la mayoría de las curvas del segundo cuartil, se observa un comportamiento similar, con curvas más suavizadas y también con un buen registro de eventos. Para el tercer y cuarto cuartil, se observan tormentas con duraciones más largas.

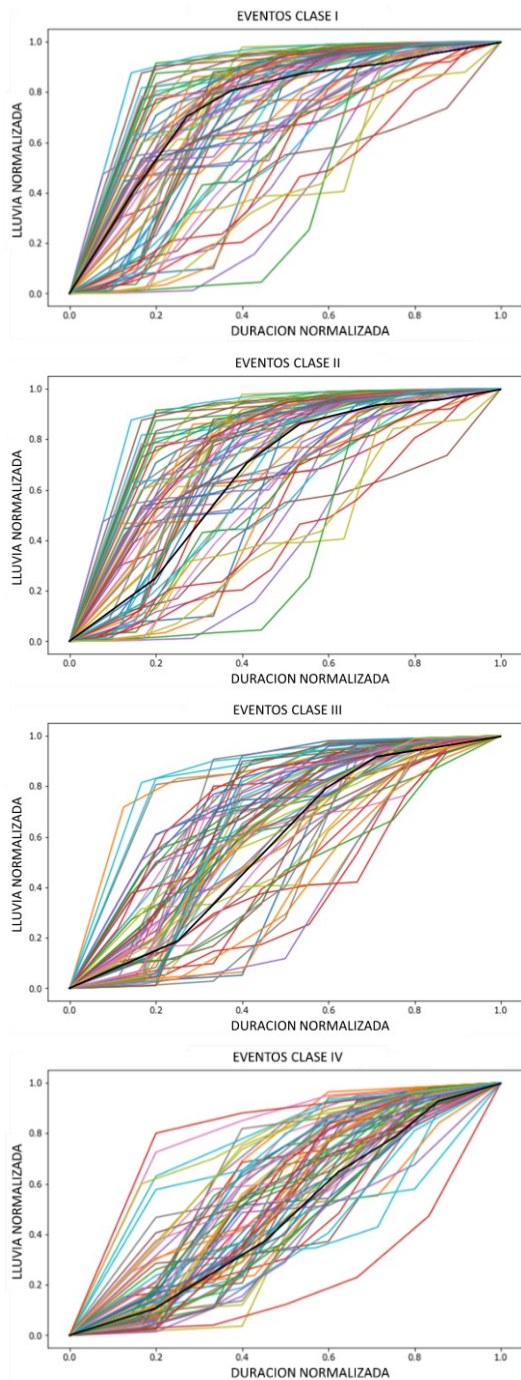


Fig 8. Curvas de Huff obtenidas para una sola estación.

Utilizando estos comportamientos de acumulados de lluvia y eventos, se clasifican los eventos en cuatro categorías (I a IV) generadas a partir de las duraciones de los eventos tal como se describen en la tabla 4.

En el gráfico de la figura 10 se muestran las duraciones del total de eventos identificados. Se observa que predominan los eventos por debajo de las cinco horas y que en menor medida se registran eventos sobre las nueve horas. Esto se debe a que en el país son más frecuentes los eventos que generan

tormentas de rápido desplazamiento y corta duración.

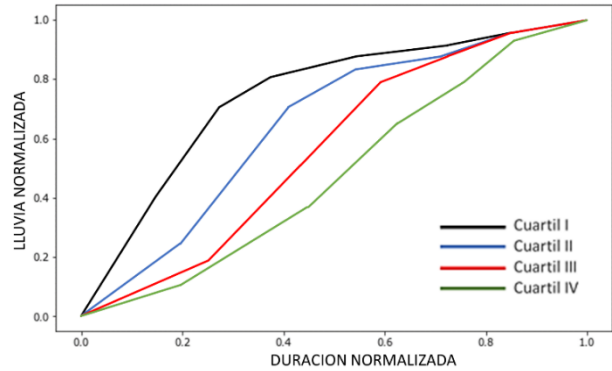
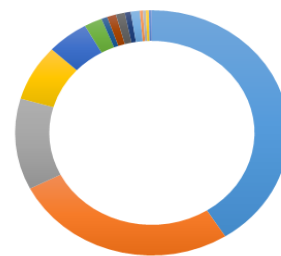


Fig 9. Ejemplos de gráfico para una estación, mostrando una curva por categoría.

TABLA 4
DURACIONES POR CATEGORÍA DE EVENTOS.

Clase	Duración (h)
I	< 3
II	3 -5
III	5 - 8
IV	8 - 20+

DURACIONES DE EVENTOS



- < 4h
- 5h
- 6h
- 7h
- 8h
- 9h
- 10h
- 11h
- 12h
- 13h
- 14h
- 15h
- 16h
- 17h
- 18h
- 19h
- 20h

Fig. 10. Duraciones considerando el total de eventos.

Cantidad de eventos

Según la categorización de eventos, se observa que la mayor cantidad de eventos se clasifican como categoría uno, seguido de la categoría dos, siendo los eventos de tormentas más frecuentes en el país.

En tercer lugar, se encuentran los eventos categoría 4, de 8 a más horas, seguidos por los eventos, categoría tres, con duraciones de 5 a 8 horas. A partir de estos hallazgos, se considera conveniente realizar otros estudios que ayuden a determinar las causas de este conteo significativo de eventos categoría 4. para determinar si existen o no más eventos meteorológicos que causan este tipo de duraciones largas con respecto a los que causan duraciones medias o si mas bien, el resultado está relacionado con fallas en la transmisión de datos.

4) *Análisis de frecuencias de precipitaciones intensas.*

Para cada una de las estaciones y utilizando los umbrales de 30mm/h y 50 mm/h, se calculó el número total de horas por año en las que se alcanzaron dichos umbrales de lluvia.

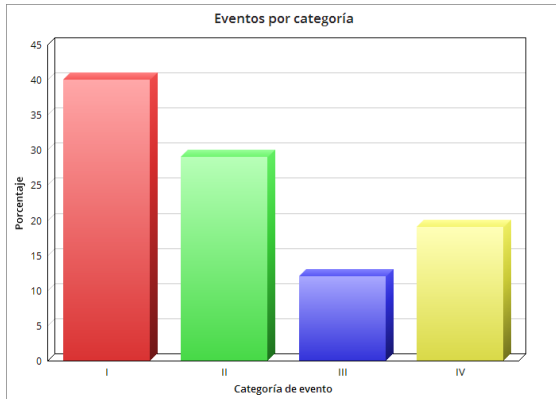


Fig.11. Porcentaje de eventos por categorías.

Frecuencias por análisis visual: para facilitar la comparación y visualización del comportamiento de los datos, se elaboró un mapa de calor, según se muestra en la figura 12. Este mapa utiliza una gama de colores para representar los valores, permitiendo así identificar patrones o anomalías en los datos de forma intuitiva.

Se detectó un comportamiento atípico en la estación Belloso durante los primeros años del conjunto de datos, lo que podría indicar errores de medición o problemas en la estación. Este patrón anómalo no se observó en otras estaciones de la red, sugiriendo posibles fallos en la configuración, calibración o ubicación de la estación Belloso. Esta anomalía se manifestó tanto para los umbrales de precipitación de 30 mm/h como de 50 mm/h, destacando su singularidad.

La figura 13 ilustra las series temporales del conteo de horas que exceden ambos umbrales, complementadas con el promedio de todas las estaciones para ofrecer una perspectiva general del comportamiento pluvial en el AMSS. Se resaltan nuevamente los valores anómalos en la estación Belloso, mencionados previamente. Además, se pone en relieve la estación Boquerón por registrar un número inusual de eventos de precipitación que superan los 30 mm/h, pero no los 50 mm/h durante el periodo 2017-2018. Esta observación señala la necesidad de un examen más detallado para esclarecer las causas de tales incrementos.

Análisis estadístico de tendencia: Sobre las series anuales que superan los 30 mm/h y los 50 mm/h se aplicó la prueba de Mann Kendall en el promedio de

todas las estaciones. Esta prueba describe si existe una tendencia o no al aumento o disminución de dichos registros por estación. La tabla 5 permite concluir que, para el promedio de todas las series, no existe una tendencia al aumento o disminución de los registros horarios que superen los 30 mm/h y los 50 mm/h entre el período de 2010 a 2022.

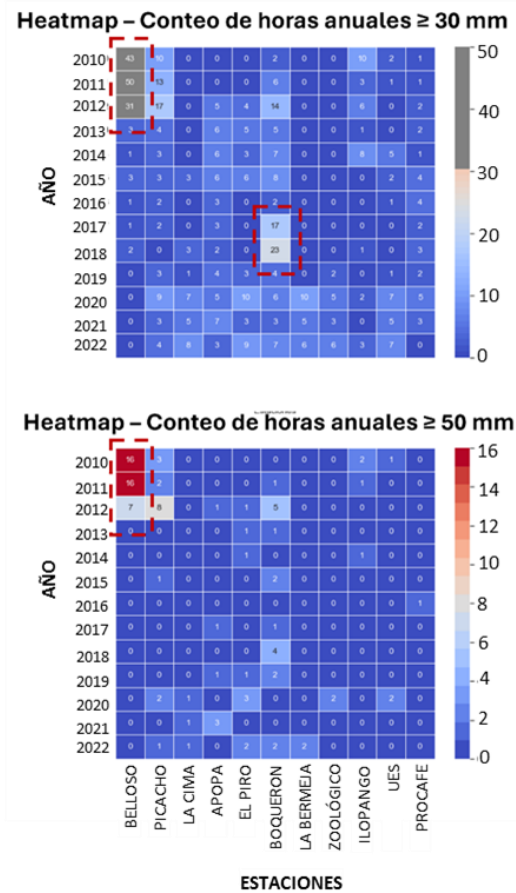


Fig. 12. Mapas de calor de conteo de precipitaciones que superan los 30 y 50 mm en una hora por estación por año.

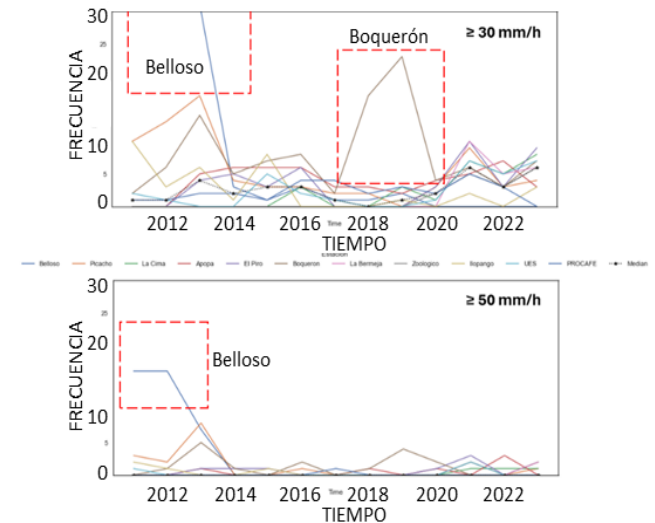


Fig. 13. Tendencias de frecuencias de precipitaciones que superan los 30 y 50 mm por hora por estación en la red AMSS por año.

TABLA 5
RESULTADOS PRUEBA MANN KENDALL

Mann Kendall test ->= 30 mm	
Kendall tau	0.2904
P valor	0.1879
Resultado	No se detecta una tendencia significativa
Mann Kendall test ->= 50 mm	
Kendall tau	-0.0403
P valor	0.852
Resultado	No se detecta una tendencia significativa

La gráfica de la figura 14 permite observar el comportamiento de las precipitaciones durante las horas del día en el AMSS. Este comportamiento está descrito a través del promedio de lluvia horaria multianual durante la estación lluviosa. Se observa que la lluvia se ajusta al conocimiento empírico en el que se establece que las precipitaciones en El Salvador comienzan a registrarse en los alrededores de la cadena montañosa en horas del mediodía y aumentan durante la tarde y hacia la noche en el país. Además, esta figura permite observar tres periodos de incrementos en las precipitaciones en el AMSS los cuales se describen como:

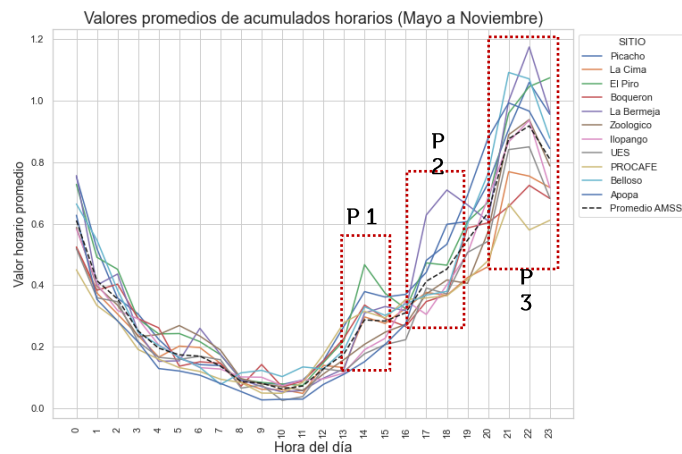


Fig. 14. Lluvia horaria promedio multianual por estación.

- **Período 1:** En horas cercanas al mediodía (13 – 15 hrs) ocurre el primer incremento de precipitación, siendo la estación El Piro la que registra un mayor aumento en el promedio de las precipitaciones.
- **Período 2:** A final de la tarde (16 – 18 hrs) se registra un incremento que no es identificado en todas las estaciones, siendo La Bermeja el sitio de mayores registros en este período.
- **Período 3:** En horas de la noche (entre las 20 a 22 hrs) se registra el último período significativo en el incremento de las precipitaciones. Donde la estación La Bermeja y Belloso registran los promedios mayores.

B. *Análisis Espacial.*

Para las distribuciones espaciales de lluvia, han sido consideradas únicamente la lluvia que supera 1 mm/h registrada entre los meses de mayo a noviembre.

1) *Acumulados anuales.*

Utilizando las series horarias, se identificaron las distribuciones anuales durante la estación lluviosa de cada año de la serie de estudio. El cálculo anual corresponde a la suma de los meses con valores que cumplen el 70% de los datos mensuales. La figura 15 muestra una comparativa entre los años 2014 y 2022, donde se observa una distribución de precipitación similar en ambos años. Los mayores acumulados se distribuyen hacia las mayores altitudes, en el Volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, y hacia el oeste. Valores menores de precipitación se registran en el valle del AMSS y hacia el este del área de interés. Las diferencias entre los registros acumulados estacionales máximos y mínimos rondan los 500 mm de lluvia.

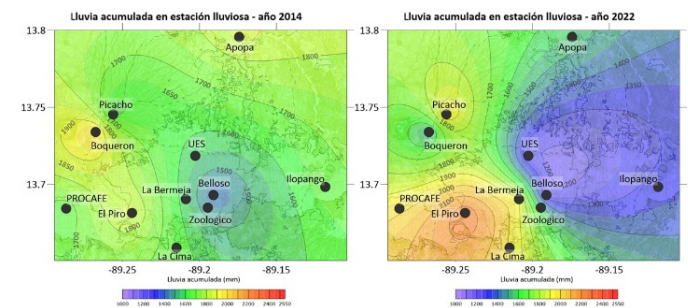


Fig.15. Distribución espacial de lluvia acumulada, comparativa entre los meses de estación lluviosa 2014 y 2022.

2) *Horas de lluvia.*

El análisis de la distribución espacial de las horas lluviosas durante los años 2014 y 2022, ilustrado en la figura 16, revela patrones consistentes con los acumulados anuales de precipitación.

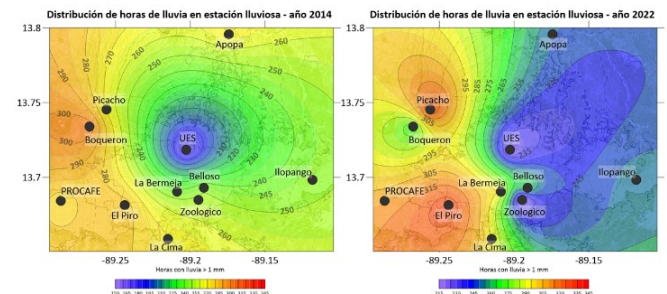


Fig.16. Distribución espacial de horas de lluvia (>1mm), comparativa entre los meses de la estación lluviosa 2014 y 2022.

Se observa que las estaciones ubicadas en altitudes más elevadas y hacia el oeste registran un número mayor de horas lluviosas. En contraste, en el valle del AMSS y sus áreas orientales, la frecuencia de horas

lluviosas tiende a disminuir. La variación en el número de horas lluviosas entre las estaciones más activas y las menos activas fluctúa entre 60 y 90 horas. Este patrón subraya la influencia de la topografía y la orientación geográfica en la distribución de las precipitaciones dentro de la región.

3) *Lluvia mensual.*

El análisis de la distribución mensual de la lluvia, basado en registros multianuales de mayo a octubre, revela una variabilidad espacial significativa. Se observan anomalías positivas en estaciones como Picacho, El Piro y La Bermeja durante varios meses. En contraste, noviembre presenta precipitaciones considerablemente menores, situándose por debajo de los rangos analizados, razón por la que se considera como un mes de escasos registros de lluvia.

Los análisis muestran que los meses más lluviosos en el AMSS son agosto y septiembre, con acumulados que superan los 300 mm en áreas del valle del AMSS, señalando una marcada intensidad pluvial. Además, se destaca una tendencia a una mayor distribución de lluvias en los alrededores del valle durante junio, agosto y septiembre, lo que indica una concentración pluvial importante en estas áreas.

Por otro lado, mayo presenta una inclinación hacia acumulados más elevados en las zonas altas del área de estudio, como el volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, sugiriendo una dispersión de lluvias hacia estas elevaciones al inicio de la estación lluviosa. De manera consistente, la estación Picacho registra valores significativos de precipitación a lo largo de toda la estación lluviosa, resaltando su importancia como punto de medición crítico.

4) *Eventos.*

En un análisis comparativo de dos fenómenos meteorológicos significativos, se observa cómo las lluvias y tormentas generadas impactan en el AMSS. El primer caso analizado corresponde a la Tormenta Tropical Amanda (fig. 18 izquierda), que, a finales del mes de mayo de 2020, trajo consigo lluvias torrenciales afectando considerablemente al país y al AMSS, debido a su trayectoria. Este fenómeno propició un flujo de humedad del sur que, al interactuar con las cordilleras costeras, incluidas la cordillera del Bálsamo y el volcán de San Salvador, resultó en significativos acumulados de precipitación debido a las intensidades registradas. Los máximos acumulados se observaron cerca de la cordillera del Bálsamo, destacando la estación El Piro por sus registros récord, lo que provocó desbordamientos de ríos y quebradas, así como el colapso de sistemas de drenaje en diversas áreas del AMSS.

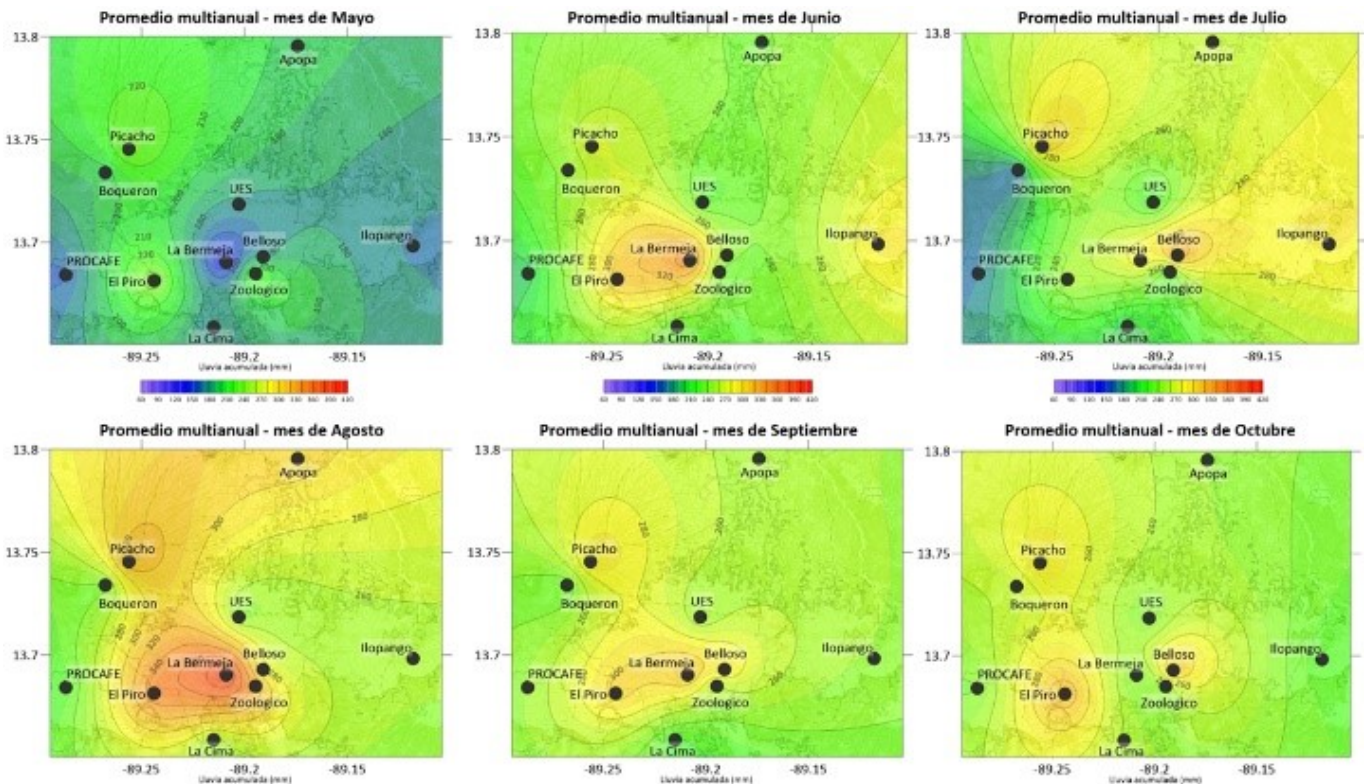


Fig.17 Distribución espacial de lluvia acumulada durante los meses de la estación lluviosa en el AMSS, obtenido a partir de los promedios multianuales 2010-2022.

Por otro lado, un evento de onda tropical en julio de 2022 (fig. 18 derecha) mostró un patrón diferente, con las estaciones ubicadas en el valle del AMSS registrando los mayores acumulados, lo que condujo a inundaciones urbanas por el fallo en los sistemas de drenaje. A diferencia de los sistemas influenciados por la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y la humedad del sur, que tienden a generar mayores acumulaciones en las zonas montañosas, los sistemas de desplazamiento este a oeste, especialmente aquellos asociados con tormentas por ondas tropicales, presentan una distribución de precipitaciones que no se limita a las altitudes más elevadas.

Este contraste subraya la importancia de realizar análisis detallados de series de eventos meteorológicos para identificar patrones más claros en la distribución de las precipitaciones que no se limita a las altitudes más elevadas.

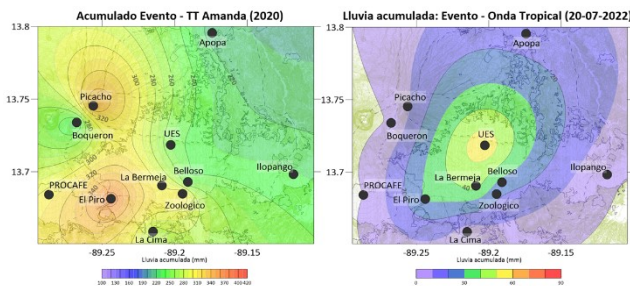
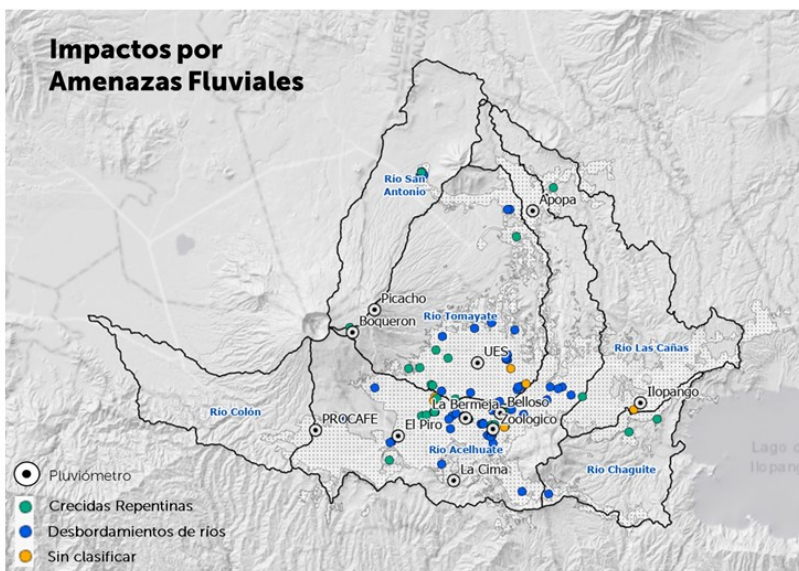


Fig.18. Comparación de la distribución espacial de lluvia entre un evento ciclónico organizado (TT Amanda, mayo 2020) y una onda tropical (julio 2022).

5) *Comportamiento de impactos en el AMSS.*

Utilizando el catálogo cualitativo de impactos hidrológicos y realizando un análisis espacial por cuenca, severidad y evento meteorológico, se ha identificado que el mayor conteo de inundaciones pluviales y fluviales que ocurren en el AMSS se encuentran en las cuencas del río Acelhuate y Tomayate. Las cuencas del río Cañas, Chaguite y San Antonio registran un bajo conteo de impactos por desbordamientos. Sin embargo, la distribución de cuencas mostradas en la figura 20, no permite analizar la amenaza hidrológica a detalle y con propósitos de generación de modelos hidrológicos e hidráulicos para el Sistema de Alerta por Inundaciones (SAT) en el AMSS. Por ello, un mapeo de las microcuencas con enfoque urbano debe ser considerado en el futuro, centrándose en sitios donde las amenazas fluviales se registran.

Se observó que las ondas tropicales, son los eventos meteorológicos generadores de lluvias que con mayor frecuencia dejan el mayor número de inundaciones en el AMSS. Asimismo, se ha identificado la necesidad de mejorar los registros del catálogo cualitativo de inundaciones, en donde un conteo considerable en el número de registros de inundaciones, tanto fluviales como pluviales, no cuentan con el campo de fenómeno meteorológico generador de la lluvia. Esta falta de información imposibilita un mejor análisis espacial de la lluvia a escala temporal de evento.



Relación impactos hidrológicos, Fenómenos meteorológicos y Microcuencas principales

Microcuenca	SD	ITCZ	VG	OE	OT	BP	DT	TT	HC
Río Chaguite	13	2	5	4	15	0	3	4	3
Río Las Cañas	19	4	3	0	9	1	0	10	2
Río Acelhuate	66	21	28	8	117	1	1	51	2
Río Tomayate	59	14	22	6	69	1	4	16	0
Río San Antonio	3	0	1	1	3	0	0	0	0
Río Colón	1	1	0	0	1	0	0	0	0

Fig.19. (Izquierda) Distribución espacial de los impactos por amenazas fluviales en el AMSS. (Derecha) Relación entre los impactos por amenazas hidrológicas según el fenómeno meteorológico generador de lluvias y la microcuenca de registro.

V. CONCLUSIONES

Los eventos de precipitación más frecuentes dentro de las series temporales analizadas son aquellos con una duración de menos de 4 horas, según se determinó utilizando el método de Huff. Los eventos con duraciones de entre 5 a 8 horas fueron algo menos frecuentes que aquellos que superan las 8 horas de duración.

Los patrones temporales observados en las estaciones del AMSS indican que la mayoría de los eventos precipitan la mayor parte de su volumen en las etapas iniciales de su desarrollo, decreciendo en intensidad posteriormente. Por otro lado, los eventos de mayor duración, de más de 8 horas, tienden a acumular la mayor cantidad de precipitación hacia el final del evento.

El análisis estadístico ha permitido la identificación de datos anómalos y potencialmente incorrectos, sugiriendo fallos en algunas estaciones. Específicamente, la estación Belloso entre 2010-2013 y la estación Boquerón entre 2017-2020 que presentaron comportamientos que indican posibles anomalías en los datos de precipitación.

Se detectaron precipitaciones anómalamente altas en ciertos meses del año en las estaciones El Piro, La Bermeja, Picacho y Boquerón, lo que sugiere la necesidad de un análisis más detallado de estas series temporales.

La aplicación de la prueba Mann-Kendall a los umbrales de 30 mm y 50 mm de precipitación horaria no mostró una tendencia clara hacia un aumento en la frecuencia de estos eventos en las series temporales estudiadas.

Las precipitaciones en el AMSS, en el contexto diario, se comportan de acuerdo con el conocimiento meteorológico empírico, en el que se establece que las primeras precipitaciones ocurren en horas cercanas al mediodía principalmente debido a lluvias orográficas. Posteriormente, en horas de la tarde y noche se registran los principales eventos de precipitación con mayor distribución espacial de lluvia.

Se constató que agosto y septiembre son los meses con mayores acumulados de precipitación en el AMSS, según los promedios mensuales multianuales, con los máximos acumulados durante la estación lluviosa registrados principalmente en zonas de

mayor altitud, como el volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, con valores aproximados de 1800 a 1900 mm.

Los resultados demuestran que los fenómenos meteorológicos juegan un rol crucial en la distribución espacial de las precipitaciones en el AMSS, afectando directamente la ocurrencia de impactos hidrológicos, especialmente aquellos relacionados con amenazas fluviales.

Las microcuencas Acelhuate y Tomayate se identificaron como áreas de particular interés para el estudio de amenazas fluviales y pluviales, mientras que, en el resto de las microcuencas los impactos fluviales a una menor frecuencia, son posibles.

VI. RECOMENDACIONES

Repetir el procedimiento de identificación de eventos de tormenta para series de datos sub horarios con calidad la calidad requerida, así como, la generación de curvas de Huff y patrones de precipitación.

A partir de las series de eventos de tormentas, realizar un análisis espacial y temporal sobre los mismos para identificar: (i) patrones de tormentas asociados a eventos meteorológico, (ii) temporalidad diurna y (iii) estacional de ocurrencia.

Entre las aplicaciones identificadas para las curvas de huff generadas por estación, se plantea el uso de los patrones para el relleno de datos en períodos faltantes. Para ello habrá que realizar estudios exploratorios que permitan establecer metodologías para el relleno de datos faltantes dentro de las series temporales.

Aplicar otras metodologías más robustas en el análisis de frecuencias, como la aplicación de la transformada rápida de Fourier, para apoyar en la identificación de frecuencia en la ocurrencia de eventos de tormentas intensas en el AMSS.

Continuar con la mejora del catálogo cualitativo de impactos hidrometeorológicos. Para lo cual será necesario identificar las fuentes de información para completar los campos de acumulado de lluvia, intensidad y fenómeno meteorológico, y realizar un análisis más complejo de los campos asociados con los eventos de tormentas.

Generación de cuencas hidrográficas en el AMSS con un enfoque en cuencas urbanas, y qué, además responda a las tecnologías y herramientas

disponibles para la generación de información y avisos para el SAT por inundaciones.

REFERENCIAS

- Alencar da Silva, Alves, Manuela Keyla, y Ranyére Silva Nóbrega. «Tendencia Pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó, Pernamcuco, Brasil.» *Revista Geográfica de América Central*, 2017.
- Blenkinsop, Stephen, Elizabeth Lewis, Steven Chan, y Hayley Fowler. «Quality control of an hourly rainfall dataset and climatology of extremes for the UK.» *International Journal of climatology*, 2016.
- Huff, F. A. «Time distribution of rainfall in heavy storm water.» *Water Resources Research*, 1967: 1007-1019.
- Jones, Mari R, Hayley J Fowler, Christopher Kilsby, y Stephen Blenkinsop. «An Assessment of changes in seasonal and annual extreme rainfall in the UK between 1961 and 2009.» *International Journal of Climatology*, 2012.
- Li, Yafei, Hayley Fowler, Daniel Argueso, y Stephen, Evans, Jason Blenkinsop. «Strong intensification of hourly rainfall extremes by urbanization.» *American Geophysical Union*, 2020.
- MARN. *Informe del Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades*. San Salvador: MARN, 2017.
- OPAMSS. *Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador*. San Salvador: OPAMSS, 2016.
- Renderos, Adriel. *Desarrollo de script para la clasificación de la calidad del dato de la red Hidrométrica Pluviométrica*. San Salvador: MARN, 2022.
- Renderos, Guillermo Adriel. *Monitoreo Hidrológico de Impactos por Inundaciones*. San Salvador: MARN, 2020.
- Sa'adi, Zulfaqar, Shamsuddin Shahid, Tarmizi Ismail, Eun-Sung Chung, y Xiao-Jun Wang. «Trends analysis of rainfall and Rainfall extremes in Sarawak, Malasysia using modified Mann - Kendall test.» *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017.
- Waskom, Michael. *Seaborn V0.13.2*. s.f. <https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.kdeplot.html> (último acceso: Octubre de 2023).