

Estado y tendencias del clima en la Región Metropolitana de Guatemala

Key Points

- En la estación INSIVUMEH se observan señales de calentamiento persistente, con un incremento acumulado de 2.3 °C en el periodo de 1972-2024.
- Aumento consistente de Temperatura máxima, representado por incremento de días cálidos y disminución de días fríos.
- Cambio generalizado de temperatura mínima con aumento de noches cálidas.
- La serie de 100 años de precipitación de INSIVUMEH muestra estabilidad relativa en el total anual de lluvia, pero con fuertes oscilaciones multidecadales entre periodos húmedos y secos.
- Entre 1970 y 2024, las tres estaciones evaluadas no evidencian un cambio en la lluvia total anual, pero sí una intensificación de eventos extremos y una mayor concentración de precipitación en pocos días.

Correspondencia a:

jrosito@ibiosfera.com

ibiosferadatas@gmail.com

Edición técnica:

Silvia Paola Pérez Cruz

Rosito Juan Carlos¹, Pérez Silvia Paola^{1,2}, Hartmann Gerritt¹, Cosseman David¹

¹Instituto Biosfera, ²World Wildlife Fund, ³Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Ciudad de Guatemala, Guatemala, ⁴Instituto Nacional de Electrificación, Ciudad de Guatemala, Guatemala, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Abstract This scientific report characterizes the observed climate conditions and recent trends in the Guatemala Metropolitan Region, with the purpose of generating robust evidence to support risk management, climate change adaptation, territorial planning, and water security in the country's most densely populated and economically strategic urban area. The study integrates daily records of temperature and precipitation from five representative meteorological stations: INSIVUMEH, Suiza Contenta, Guatemala Sur, San Pedro Ayampuc, and Compuertas Amatitlán. Depending on data availability, the analysis covers records ranging from approximately 40 to nearly 100 years, including a specific long-term assessment of the INSIVUMEH precipitation series for the period 1926–2024.

Temperature and precipitation were evaluated using internationally standardized climate indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices. This approach made it possible to identify changes in mean conditions, trends in climate extremes, and signals associated with urbanization, land-use change, topographic gradients, and regional climate variability.

The results show a consistent warming signal across the metropolitan area. At Suiza Contenta, a high-altitude peri-urban station, warming is mainly expressed through an increase in warm days and maximum temperature extremes. In contrast, at INSIVUMEH and Guatemala Sur, the warming signal is reflected more clearly in rising minimum temperatures, warmer nights, and increases in mean and maximum daily temperatures, suggesting a stronger influence of urban conditions on the local thermal regime.

Regarding precipitation, the analysis distinguishes two temporal scales: the 1970–2024 period for the main evaluated stations and the nearly 100-year INSIVUMEH series. In general, annual rainfall totals do not show a uniform or sustained long-term trend. However, the evidence indicates a clear intensification and redistribution of rainfall toward more concentrated and extreme events. The contribution of very wet and extremely wet days to annual precipitation has increased, while annual maximum one-day and five-day rainfall totals also show positive trends. This pattern suggests that the metropolitan climate is not necessarily becoming wetter in total annual volume, but rather more prone to intense rainfall pulses with greater hydrometeorological impact.

Overall, the findings point to a warmer urban–metropolitan climate and a rainfall regime increasingly shaped by short-duration, high-intensity events. These changes have direct

implications for stormwater drainage systems, flood and landslide risk, land-use planning, and the conservation of strategic recharge areas and water sources. The report highlights the need to strengthen climate-informed territorial governance and to integrate observed climate trends into metropolitan adaptation strategies.

Resumen El presente reporte científico analiza datos climáticos disponibles para la Región metropolitana de Guatemala. Esto es un aspecto poco estudiado a pesar de ser fundamental para la gestión de riesgo, la adaptación al cambio climático y la seguridad hídrica de la concentración poblacional y económica más importante de Mesoamérica.

Se integran series de datos de entre 40 y 100 años correspondientes a 5 estaciones climáticas, INSIVUMEH (ubicada en el aeropuerto La Aurora), Suiza Contenta (San Lucas Sacatepéquez), Guate Sur (Villa Nueva), San Pedro Ayampuc y Compuertas de Amatitlán. Se evaluaron las variables temperatura y precipitación a través de índices climáticos definidos según los estándares internacionales de ETCCDI. Este enfoque permitió responder al cuestionamiento de fondo sobre si hay cambios o no, definir tendencias y vincular directamente la señal climática con procesos sociales, económicos y ambientales.

En la estación Suiza Contenta (ubicada a 2200 msnm), destaca el aumento de la frecuencia de días muy cálidos y las temperaturas extremas. En las estaciones INSIVUMEH (1505 msnm) y Guate Sur (1360 msnm) el calentamiento se manifiesta principalmente, en el aumento de las temperaturas nocturnas (temperaturas mínimas diarias) y un marcado incremento de las temperaturas promedio y máximas diarias.

Respecto a la lluvia se analizan dos temporalidades, de acuerdo a la disponibilidad de datos, a) durante los últimos 60 años (en las cuatro estaciones mencionadas) y b) cerca de 100 años para la estación INSIVUMEH.

En términos generales, no se observan cambios significativos en el total anual de lluvia, pero sí un aumento notable en la concentración de la precipitación en eventos intensos. Es decir, crece la proporción de lluvia anual aportada por episodios muy húmedos (por encima del percentil 95) y extremadamente húmedos ($>p99$), junto con incrementos en los máximos de precipitación diaria (RX1day) y multidiaria (RX5day) alrededor de +0.43 mm/año y +0.87 mm/año, respectivamente.

Este patrón sugiere un clima urbano–metropolitano más cálido y con pulsos de lluvia más extremos, lo que supone desafíos crecientes para la planificación territorial.

En conjunto, los hallazgos indican la necesidad de fortalecer estrategias de gestión del balance energético de la atmósfera y aumento de temperatura, así como el manejo de sistemas de drenajes pluviales a nivel de cuenca, ordenamiento territorial y conservación de fuentes de áreas de recarga hídrica y frente a un régimen climático que ya muestra fuertes señales de cambio.

1. Introducción

El objetivo del presente reporte científico es **caracterizar el clima** de la Región Metropolitana de Guatemala mediante el análisis estadístico, histórico y espacial de las variables temperatura máxima y mínima y precipitación, las cuales han sido registradas en 5 estaciones representativas de esta zona urbana.

Se busca identificar el estado actual e indicios de cambio en el clima de una región que destaca por presentar la mayor concentración poblacional y económica de Centromérica, sur de México y el Caribe. Esta región tiene influencia sobre cerca de 4 millones de población de Guatemala y aporta más del 50% del PIB nacional. En tal sentido, enfrenta presiones ambientales particulares derivadas de la urbanización, incluyendo el efecto de **isla de calor urbana**, variabilidad hídrica y vulnerabilidad frente a eventos extremos.

La presión sobre el recurso hídrico es particularmente crítica. El abastecimiento urbano depende casi exclusivamente de agua subterránea: alrededor del 90–91 % del consumo total proviene del acuífero metropolitano (IARNA-URL & The Nature Conservancy, 2012). Estudios técnicos recientes estiman que este acuífero opera actualmente con un déficit promedio anual de 360 millones de m³, evidenciando una sobreextracción sostenida respecto de su capacidad de recarga (EMPAGUA, 2024).

Este desequilibrio se manifiesta en descensos documentados del nivel freático en sectores del valle, diagnósticos hidrogeológicos que reportan abatimientos interanuales significativos en pozos de abastecimiento urbano (Samayoa, 2013; Celada et al., 2020). Paralelamente, los cuerpos de agua superficiales —ríos, tributarios y el lago de Amatitlán— muestran deterioro severo en calidad y caudales, lo que ha desplazado aún más la presión hacia el acuífero.

A continuación se mencionan los principales factores moduladores del clima en el área de estudio, condicionan la señal climática local y pueden actuar de forma combinada sobre los patrones térmicos y pluviométricos del área metropolitana de Guatemala:

- **Teleconexiones oceánico-atmosféricas:** Una teleconexión climática se entiende como una relación entre cambios meteorológicos o climáticos que ocurren en regiones ampliamente separadas del planeta. En términos estadísticos, también puede definirse como una correlación significativa, positiva o negativa, entre las fluctuaciones de un campo meteorológico en puntos distantes, comúnmente evaluada en escalas temporales mensuales o mayores (American Meteorological Society, s. f.). Entre las teleconexiones más estudiadas y que mayor correlación han mostrado entre los océanos y los patrones climáticos, especialmente precipitación, en la región mesoamericana se encuentran las siguientes:
 - **Variabilidad oceánica (ENSO)** – El fenómeno El Niño/Oscilación del Sur modula el transporte de humedad hacia Centroamérica a través del chorro de bajos niveles del Caribe. Durante El Niño suele disminuir la lluvia en la región, mientras que La Niña favorece excesos y eventos extremos. Estos patrones han sido documentados en estudios regionales (e.g., Durán-Quesada *et al.*, 2017; Magaña *et al.*, 1999).

- **Teleconexión del Atlántico Norte Tropical (ATN):** la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte Tropical modula la lluvia en Centroamérica. Fases cálidas del ATN favorecen estaciones lluviosas más intensas y prolongadas, mientras que fases frías se asocian con déficits. La interacción entre ATN y ENSO potencia extremos de lluvia o sequía, según su combinación (Wang & Enfield, 2001).
- **Urbanización (Isla de calor urbana)** – La expansión urbana eleva la temperatura del aire y de la superficie. Mediciones locales muestran que parques urbanos en la Ciudad de Guatemala mantienen temperaturas del aire $\approx 2.0\text{--}3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ más bajas que las zonas asfaltadas circundantes; esta diferencia confirma la atenuación que proporcionan las áreas verdes (LS3 USAC, 2013) y es consistente con guías internacionales de mitigación del efecto de calor urbano (por ejemplo, estrategias de la EPA, 2025).
- **Orografía compleja** – La ciudad se ubica en el Altiplano Central de Guatemala, una región montañosa (Sierra Madre) con altitudes de 1,000–4,000 msnm. y valles tectónicos. El Valle de la Ciudad de Guatemala es considerado una depresión tectónica (graben) dentro de esta provincia volcánica. La disposición de cordilleras y valles genera fuertes gradientes espaciales de precipitación y modula fenómenos estacionales como la **canícula**. Estudios locales sugieren que cambios en la topografía pueden alterar la duración e intensidad de la canícula (Batz, 2023).

Contar con una **caracterización climática detallada** y técnicamente fundamentada, basada en registros históricos de estaciones meteorológicas estratégicas y con más de 50 años de datos, es fundamental. Dicho conocimiento permite comprender las dinámicas atmosféricas locales y sirve de insumo para la **planificación integral del territorio, gestión de riesgos, protección del recurso hídrico y adaptación al cambio climático**. Asimismo, orienta la formulación de políticas públicas adecuadas para el desarrollo basado en premisas sistémicas.

El presente estudio aporta evidencia científica para guiar acciones territoriales en un área de alta relevancia nacional, donde la presión sobre los recursos naturales –en particular el agua– exige respuestas técnicas urgentes.

2. Datos y Métodos

Área de estudio y datos:

La Región Metropolitana de Guatemala para el presente estudio está definida por las cuencas hidrológicas de río Las Vacas y río Los Ocotes, que drenan hacia el norte al río Motagua; y las cuencas de los ríos Villalobos y Michatoya y Lago Amatitlán que drenan hacia el sur, es decir al Océano Pacífico. Dicha región incluye sectores semiplanos centrales, altamente urbanizados y las periferias con relieves “montañosos” y menor densidad urbana (Figura 1).

Selección de estaciones climáticas

La **Organización Meteorológica Mundial (OMM)** define las *normales climatológicas* como promedios de **30 años**, actualizados sistemáticamente por década, lo cual provee una base estable para describir el estado medio del clima.

A partir de esto se seleccionaron las estaciones climáticas principales siguientes: estación INSIVUMEH (ciudad de Guatemala, ~1500 m), la estación San Pedro Ayampuc (1290 m) y la estación Suiza Contenta (periferia occidental alta, San Lucas Sacatepéquez, ~2100 m). Estas cubren un periodo de mediciones de más de 50 años (1970–2024) con datos diarios de precipitación, temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) (Tabla 1 y Figura 1).

Además, se incorporaron las estaciones Compuertas Amatitlán y Guatemala Sur para enriquecer el análisis pluviométrico espacial, particularmente para la elaboración de mapas de precipitación promedio del periodo 1990–2024. Aunque estas estaciones no cuentan con registros climáticos de periodos anteriores, su inclusión es relevante para caracterizar el gradiente espacial de lluvia dentro del Área Metropolitana de Guatemala, especialmente en las zonas sur y suroeste donde influye la topografía del valle y la cercanía al lago de Amatitlán (Cuadro 1).

La estación INSIVUMEH, es la única estación que cuenta con datos de precipitación de cerca de 100 años 1926-2024 y se realiza un análisis particular.

Control de calidad de datos

Previo al análisis, todas las series fueron sometidas a un proceso escalonado de control de calidad. En una primera fase, se identificaron valores anómalos o fuera de rango y se evaluó su consistencia mediante comparación con estaciones cercanas y con el contexto meteorológico correspondiente a fechas asociadas con sequías, frentes fríos, tormentas, huracanes y otros eventos extremos.

Con base en esta revisión, los registros se conservaron, se marcaron como dudosos o se sustituyeron por valores faltantes cuando no existía sustento suficiente para considerarlos confiables. Posteriormente, se seleccionaron las estaciones con mejor continuidad temporal, calidad general de datos y representatividad espacial para su análisis con el programa informático Climact (Climact Team, 2020).

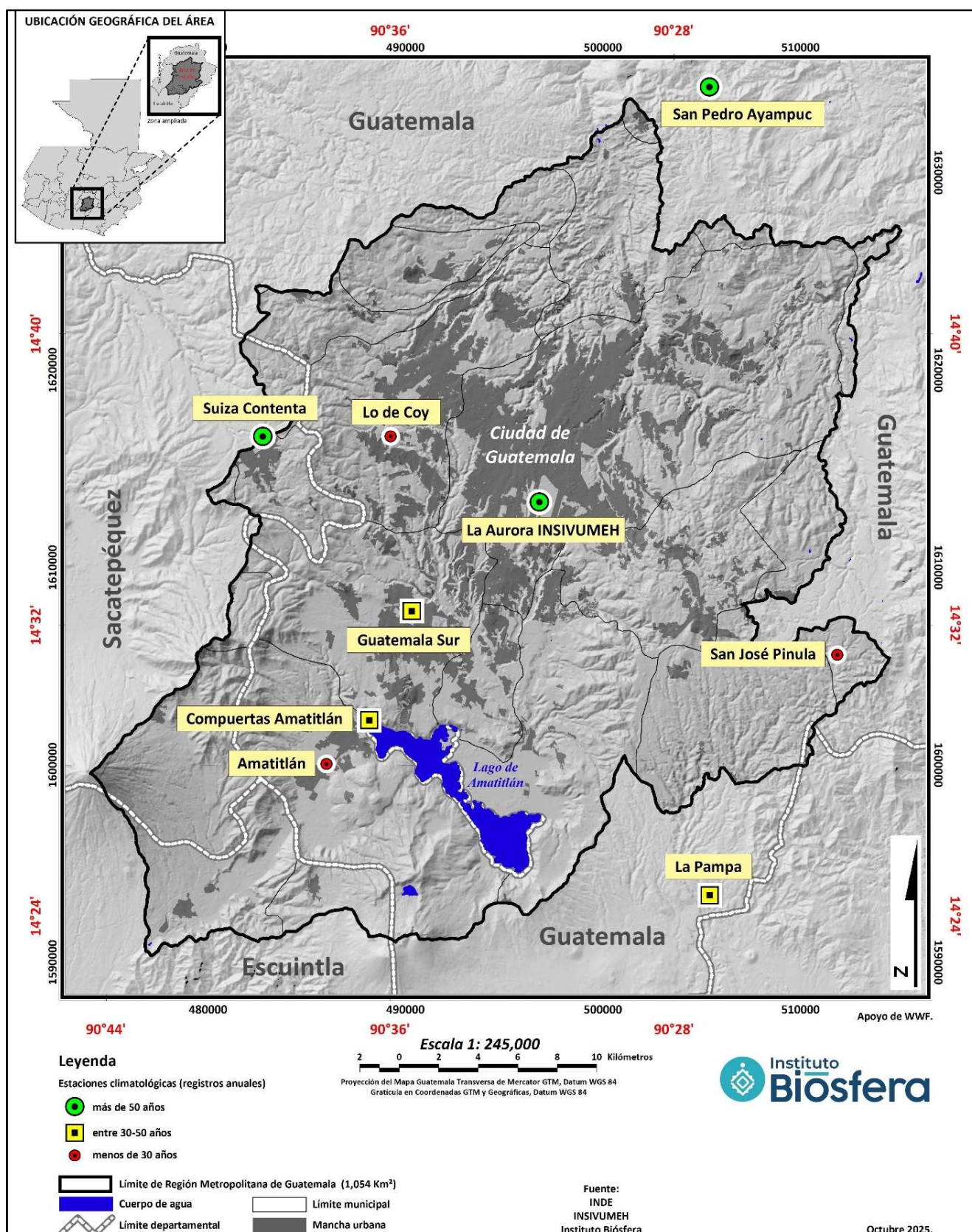


Figura 1. Ubicación de las estaciones climatológicas analizadas en la Región Metropolitana de Guatemala.

Fuente: Instituto Bíosfera (2025), con base en registros de INSIVUMEH e INDE.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas principales analizadas en el Área Metropolitana de Guatemala (cuenca del Villalobos). Se indican sus registros disponibles (años), variables medidas y observaciones.

Estación (Municipio)	Periodo de datos	Años de datos	PP	T. Máx	T. Mín	Observaciones de calidad
INSIVUMEH (Guatemala)	1926–2024 (analizado 1970–2024)	~99	✓	✓	✓	Serie larga y continua (referencia urbana principal).
San Pedro Ayampuc (San Pedro Ayampuc)	1970–2024	~54	✓	✓	✓	Serie larga, algunos datos faltantes antes de 1980.
Suiza Contenta (San Lucas Sacatepéquez)	1970–2024	~54	✓	✓	✓	Serie larga en periferia alta; buena calidad general.
Compuertas Amatitlán (Amatitlán)	1978–2024	~46	✓	–	–	Solo precipitación; complementa cobertura sur.
Guatemala Sur (Villa Nueva)	1991–2024	~33	✓	✓	✓	Serie intermedia; utilizada comparativamente.

Nota: “✓” indica variable disponible. Temp. = Temperatura.

Índices climáticos

Para evaluar tendencias centrales, variabilidad y extremos climáticos, se calcularon índices recomendados por el Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). En total se analizaron 27 índices de uso estandarizado internacionalmente (ETCCDI, 2009). A continuación, se presentan aquellos indicadores seleccionados para alcanzar los objetivos del estudio y facilitar la comprensión y comunicación de los resultados:

- **TX90p / TX10p** – Porcentaje de días cálidos (Tmax > p90) y días fríos (Tmax < p10) del periodo base. Miden la frecuencia de extremos cálidos y fríos diurnos.
- **TN90p / TN10p** – Porcentaje de noches cálidas (Tmin > p90) y noches frías (Tmin < p10). Indican extremos térmicos nocturnos.
- **WSDI / CSDI** – Duración de olas de calor (Warm Spell Duration Index: número de días en rachas ≥6 días con Tmax > p90) y de olas de frío (Cold Spell Duration Index: rachas ≥6 días con Tmin < p10).
- **TXx / TNn** – Temperatura máxima más alta del año, y temperatura mínima más baja del año, respectivamente. Representan extremos absolutos de calor diurno y frío nocturno.
- **SU25 / TR20** – Número de “días de verano” (Summer Days, Tmax > 25 °C) y de “noches tropicales” (Tropical Nights, Tmin > 20 °C), indicadores relevantes en clima urbano.
- **DTR** – Rango diurno de temperatura (Diurnal Temperature Range): diferencia entre la temperatura máxima (Tmax) y la temperatura mínima (Tmin) del día. Indica la amplitud térmica diaria y describe cuán marcada es la variación entre el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno

- **PRCPTOT** – Precipitación total anual en días húmedos (≥ 1 mm). Indica si un año fue globalmente más húmedo o seco.
- **RX1day / RX5day** – Máximo de precipitación en 1 día / en 5 días consecutivos. Señalan eventos de lluvia extrema de corta duración y de periodos multi-día, respectivamente, críticos para inundaciones repentinas y deslizamientos.
- **R95pTOT / R99pTOT** – Total anual de precipitación en días muy húmedos (>percentil 95) y extremadamente húmedos (>p99) del periodo base. Miden la *concentración de la lluvia en eventos intensos*.
- **SDII** – Índice simple de intensidad de precipitación (mm/día húmedo). Refleja la intensidad media de la lluvia cuando llueve.
- **CDD / CWD** – Duración de la racha más larga de días secos (Consecutive Dry Days) y de días húmedos (Consecutive Wet Days). Relacionados con sequías meteorológicas (CDD) y periodos lluviosos prolongados (CWD) que saturan suelos.

Programa de análisis estadístico.

Los índices anuales se calcularon con la herramienta **ClimPACT2/CLIMDEX** en lenguaje R, que aplica definiciones ETCCDI uniformes. Para detectar tendencias temporales se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall con cálculo de pendiente de Sen para la magnitud del cambio anual. Se consideró significancia estadística al nivel $p < 0.05$ (95% de confianza). Adicionalmente, se inspeccionaron las series mensuales para evaluar cambios estacionales (p.ej. cambios en la distribución intraanual de lluvia, o desplazamientos en fechas de extremos anuales). Los resultados se presentan mediante gráficas de series de tiempo con sus rectas de tendencia.

Elaboración de mapas analíticos

Además, los promedios interanuales resultantes se utilizaron para la interpolación espacial mediante el método de ponderación inversa de la distancia (IDW), con el fin de representar de manera continua los patrones medios de precipitación.

Así mismo, se aplicó el **método de interpolación IDW** para la elaboración de mapas de tendencias de los índices climáticos PRCPTOT, R95pTOT, RX5day, SDII, TX90p, TX10p, DTR y TN90p (Cuadro 2). Para estos productos se utilizaron las estaciones con series adecuadas: INSIVUMEH y Suiza Contenta (1970–2024), y Guatemala Sur (1991–2024), lo que permitió generar superficies espaciales de tendencia que representan de manera coherente la distribución del cambio climático local dentro del Área Metropolitana de Guatemala.

La elección del método IDW responde a su estabilidad y buen desempeño en contextos con baja densidad y distribución heterogénea de estaciones meteorológicas. A diferencia de métodos geoestadísticos más complejos, IDW no requiere suponer un modelo de variabilidad espacial y preserva mejor los valores observados en territorios con topografía compleja, como el área metropolitana (Burrough & McDonnell, 1998). Por ello, constituye la opción más adecuada para representar patrones y tendencias climáticas en la región.

3. Resultados y discusión

Previo a la discusión, se presenta una síntesis de las principales tendencias identificadas en los índices climáticos seleccionados. El cuadro permite comparar la dirección, magnitud y significancia estadística de los cambios observados en temperatura y precipitación durante el periodo 1970–2024, y sirve como base para interpretar los patrones térmicos y pluviométricos descritos en las secciones siguientes.

Tabla 2. Tendencias de los índices climáticos más relevantes en la Región Metropolitana de Guatemala. Periodo 1970–2024.

Variable	Indicador	Unidad Medida	INSIVUMEH	Suiza Contenta	Guatemala Sur
Temperatura	TX90p	pp/año	↑† 0.306	↑† 0.468	~ 0
	TN90p	pp/año	↑† 0.385	~ 0	↑† 0.059
	DTR	°C/año	→ 0.002	↑† 0.093	↑† 0.125
	TX10p	pp/año	↓† 0.196	↓† 0.157	↓† 0.310
Precipitación	PRCPTOT	mm/año	↑‡ 4.47	↑ 5.32	~ 0
	RX1day	mm/año	↑† 0.43	~ 0	→ 0.014
	RX5day	mm/año	↑† 0.87	↑ 0.55	~ 0
	R95pTOT	pp/año	↑† 0.28	↑ 0.20	~ 0
	SDII	mm/día/año	↑ 0.040	↓ 0.0089	~ 0
	R20mm	días/año	~ 0	~ 0	↑† 0.10

Nota. ↑ aumento; ↓ disminución; → sin cambio direccional robusto. † significativo ($p < 0.05$); ‡ evidencia débil ($0.05 \leq p < 0.10$). Cuando no aparece símbolo de significancia, la tendencia no fue significativa. pp = puntos porcentuales.

3.1 Tendencias de temperatura y extremos térmicos. Periodo 1970–2024.

La temperatura media anual en la estación INSIVUMEH presenta una tendencia de +0.043 °C/año, equivalente a un incremento acumulado aproximado de +2.2 °C en el periodo 1972–2024. Esto evidencia un cambio térmico consistente y estadísticamente significativo, y está en concordancia con la señal reportada para Guatemala y Centroamérica (Aguilar et al., 2005; IPCC, 2021).

En esta estación, situada en el núcleo urbano (~1500 m), el calentamiento afecta tanto las **temperaturas máximas como las mínimas**. Considerando este periodo, los días extremadamente calurosos (TX90p) aumentan cerca de **+3.1 % por década**, mientras que los días fríos (TX10p) disminuyen aproximadamente **–2.0 % por década** ($p < 0.001$). De forma simultánea, las noches cálidas (TN90p) crecen alrededor de **+3.9 % por década**, y las noches frías (TN10p) se reducen en torno a **–2.4 % por década** ($p < 0.001$).

Este patrón, con incrementos paralelos en extremos diurnos y nocturnos, es coherente con el efecto de isla de calor urbano ampliamente documentado en ciudades tropicales de altura (Stewart & Oke, 2012). Aunque el rango diurno (DTR) no muestra cambios estadísticamente significativos, si se observa un aumento reciente en la ocurrencia de noches tropicales (TR20). Estos eran inexistentes antes de 2008, pero con una ocurrencia de entre 1 y 5 noches por año desde 2010, lo cual sugiere un **cambio estructural en la climatología nocturna urbana**.

La estación Suiza Contenta (~2100 msnm), muestra un marcado aumento del porcentaje de días extremadamente cálidos (TX90p), alrededor de **+2.2 % por década**, mientras que los días fríos (TX10p) se reducen cerca de **-14.9 % por década**, evidenciando una desaparición acelerada de jornadas frías (**Figura 2**).

La temperatura máxima absoluta anual (TXx) se incrementa aproximadamente **+0.54 °C por década** y el rango diurno de temperatura (DTR) aumenta en torno a **+0.93 °C por década**, lo cual evidencia calentamiento que se concentra principalmente durante el día.

En contraste, no se observa una tendencia estadísticamente significativa en los extremos térmicos nocturnos (TN90p, TN10p), lo cual puede vincularse a la mayor altitud y cierto alejamiento del área con mayor urbanización y los factores que atenúan el efecto de isla de calor durante la noche (LS3-USAC, 2013).

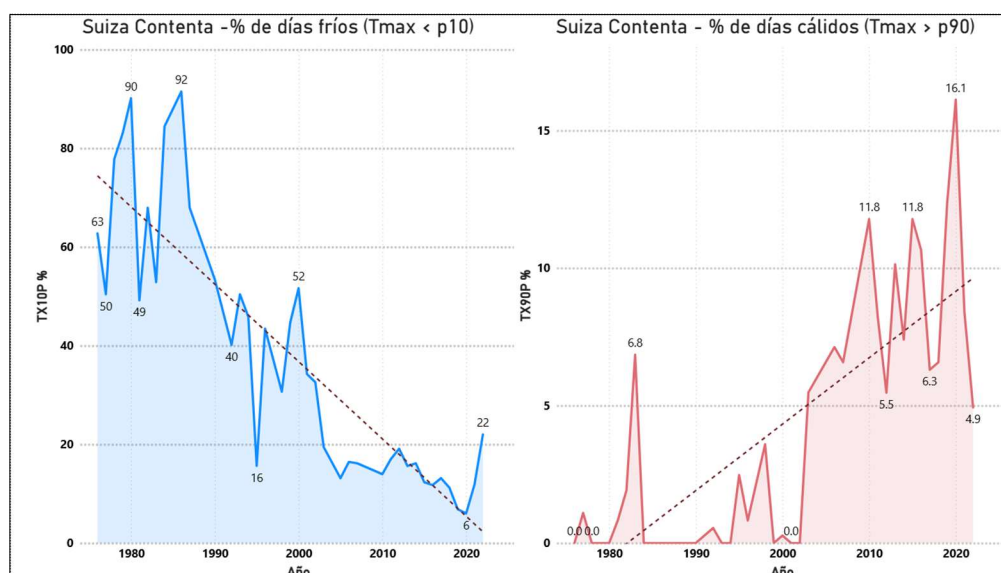


Figura 2. Tendencias de días fríos (TX10p) y días cálidos (TX90p) en la estación Suiza Contenta (1970–2024).

Fuente: Instituto Biosfera (2025), con base en registros de INSIVUMEH e INDE.

Distribución de la temperatura diurna se está reconfigurando hacia un clima más cálido: los días fríos pierden frecuencia a un ritmo cercano a -2% por década, mientras que los días extremadamente calurosos aumentan alrededor de +3% por década.

En la estación **San Pedro Ayampuc**, varios índices no alcanzan significancia estadística, ello se atribuye principalmente a la calidad de la serie. Destaca la convergencia hacia un mismo patrón regional: **más días y noches cálidas y menos días fríos**.

3.2 Tendencias de precipitación y eventos extremos

El análisis pluviométrico del período 1970–2024 en la Región Metropolitana no muestra una tendencia clara respecto al cambio en la precipitación anual. Sin embargo, sí se observan cambios muy acentuados respecto a la distribución de la lluvia interanual e interdecadal. Por ejemplo, en las cuatro estaciones climáticas principales existe mayor concentración en eventos extremos, intensificación de máximos diarios, multidiarios y mayor aporte relativo de

eventos del percentil 95 (R95pTOT). Estos cambios modifican la estructura de la distribución de la lluvia estacional, anual e interanual, aun sin alterar fuertemente el total anual.

- **Estación Suiza Contenta – Periodo 1970–2024**

En Suiza Contenta, el total anual de precipitación **no presenta un cambio estadísticamente significativo**. Sin embargo, el indicador **R95pTOT** muestra un aumento leve principalmente en la última década, indicando **mayor frecuencia de los eventos más intensos**. Los índices de distribución de precipitación (RX1day y RX5day) no presentan tendencias o cambios definidos.

- **Estación San Pedro Ayampuc – Periodo 1970–2024**

Mayor variabilidad interanual, con años que oscilan entre ~800 mm (años secos) y más de 1500 mm (años húmedos). Las tendencias lineales de PRCPTOT, RX1day y RX5day no fueron significativas; sin embargo, el análisis de extremos evidencia la persistencia de eventos relevantes. En particular, se registran rachas de días húmedos consecutivos ($CWD \geq 7$) de forma recurrente, con máximos que alcanzan aproximadamente **15–16 días consecutivos**, así como eventos de precipitación acumulada en cinco días (RX5day) que superan los **180 mm**. Estos resultados confirman que, aun sin tendencias estadísticas significativas, la estación presenta condiciones propicias para posibles eventos de impacto hidrológico.

- **Estación INSIVUMEH (núcleo urbano, 1500 m) – Periodo 1970–2024**

En la estación urbana central, el total anual muestra un **incremento de +4.5 mm/año** y una alta variabilidad interanual que sigue siendo dominante. Los indicadores de lluvia extrema exhiben señales claras: la fracción de lluvia aportada por eventos muy intensos (**R95pTOT**) muestra una tendencia positiva significativa ($p < 0.01$), aumentando en **+2.8 puntos porcentuales por década**. Igualmente, los eventos extremadamente húmedos (**R99pTOT**) incrementan su contribución. Los máximos anuales en 1 día (**RX1day**) y en 5 días (**RX5day**) también presentan aumentos significativos (+0.43 y +0.87 mm/año, respectivamente).

En décadas previas, el máximo diario anual rondaba 60–80 mm; en años recientes supera los 100 mm.

Se observa una tendencia ascendente en **R95pTOT** ($p < 0.01$), lo que sugiere una mayor concentración de la precipitación anual en eventos intensos, aun sin observarse un incremento sostenido del total anual. (Cuadro 2)

Esto indica una intensificación de los eventos de precipitación, asociada a una mayor concentración de lluvia en periodos cortos. En contextos urbanos, este comportamiento puede verse favorecido por la combinación de superficies impermeables, reducción de cobertura vegetal, mayor almacenamiento de calor y efecto de isla de calor urbana, factores que modifican los flujos de energía y humedad y pueden intensificar la convección local bajo condiciones atmosféricas favorables (Oke, 1987; IPCC, 2021).

- **Serie de 100 años – INSIVUMEH (1926–2024)**

La serie histórica de 100 años de precipitación total anual (PRCPTOT) de la estación INSIVUMEH no muestra un cambio sostenido que esté claramente definido. Sin embargo, si se evidencia una marcada **variabilidad interanual y multidecadal**. Los años con mayores acumulados de precipitación superan los 1,800 mm, asociado con lluvias intensas. Los valores

más bajos de precipitación anual, en orden descendente, son: 1972, 1978, 1927 y 1946, todos con valores menores de 800 mm.

La **media móvil de 10 años** revela **oscilaciones persistentes de humedad y sequía**. Durante las décadas de 1930 y 1950 se observan períodos predominantemente húmedos, entre los cuales se intercalan períodos relativamente secos, tal como las décadas 1940, 1970 y 1980. Posteriormente, entre 2000 y 2020 se registra un repunte en la precipitación total, antes de un nuevo descenso en los últimos años (**Figura 3**). **Estas oscilaciones pueden ser el reflejo de la influencia de forzantes climáticos de gran escala, tal como las teleconexiones climáticas.**

Los factores que originan la **variabilidad climática natural en Mesoamérica**, son modulados principalmente por la **Oscilación del Sur (ENSO)** y la **variabilidad del Atlántico Norte tropical (ATN/AMO)**. Fases cálidas de ENSO (El Niño) suelen coincidir con déficits de precipitación anual en el altiplano central, y fases frías (La Niña) favorecen acumulados superiores al promedio, en concordancia con estudios regionales (Magaña et al., 2003; Giannini et al., 2001; Wang & Enfield, 2001). Este es un tema que debe ser objeto de mayor investigación.

Este comportamiento multidecadal indica que los cambios en la intensidad de la lluvia observados recientemente **no corresponden a una mayor lluvia total**, sino a una reorganización interna hacia eventos más intensos y concentrados, consistente con la física del calentamiento global y la mayor capacidad de la atmósfera para retener y liberar humedad.

Aunque los totales anuales se mantienen relativamente estables (Figura 4), la forma en que llueve sí está cambiando: la fracción de lluvia anual aportada por eventos muy intensos pasó de valores cercanos al 15–20% en las primeras décadas a alrededor de 25–30% en años recientes.

A lo largo de la serie, la proporción temporal del total de lluvia anual que se concentra en eventos extremos, definidos como aquellos días con precipitación superior al percentil 95 (R95PTOT, %), presenta una tendencia creciente, con valores promedio que pasan de rangos cercanos al 15–20% en las primeras décadas a valores en el orden de 25–30% en los años recientes. Este comportamiento evidencia una mayor concentración de la lluvia anual en eventos de alta intensidad, aun cuando el total anual de precipitación no muestre una tendencia lineal claramente definida. (Figura 4).

Además, se analizó la **estacionalidad** de la lluvia. Los datos confirman el régimen bimodal típico: temporada lluviosa de mayo a octubre, interrumpida por la *canícula* en julio-agosto (reducción temporal de lluvia a mitad de la estación lluviosa). No se detecta un cambio estadístico significativo en el inicio o fin de la estación lluviosa, ni en la duración de la canícula, dentro del periodo analizado. Aun así, se notó que en años más recientes la recuperación de lluvias post-canícula (septiembre) tiende a ser muy abrupta, con algunos septiembres excediendo récords de precipitación. Esto realza la importancia de la planificación de **acciones de mitigación e infraestructura** antes del pico de lluvias de fin de temporada.

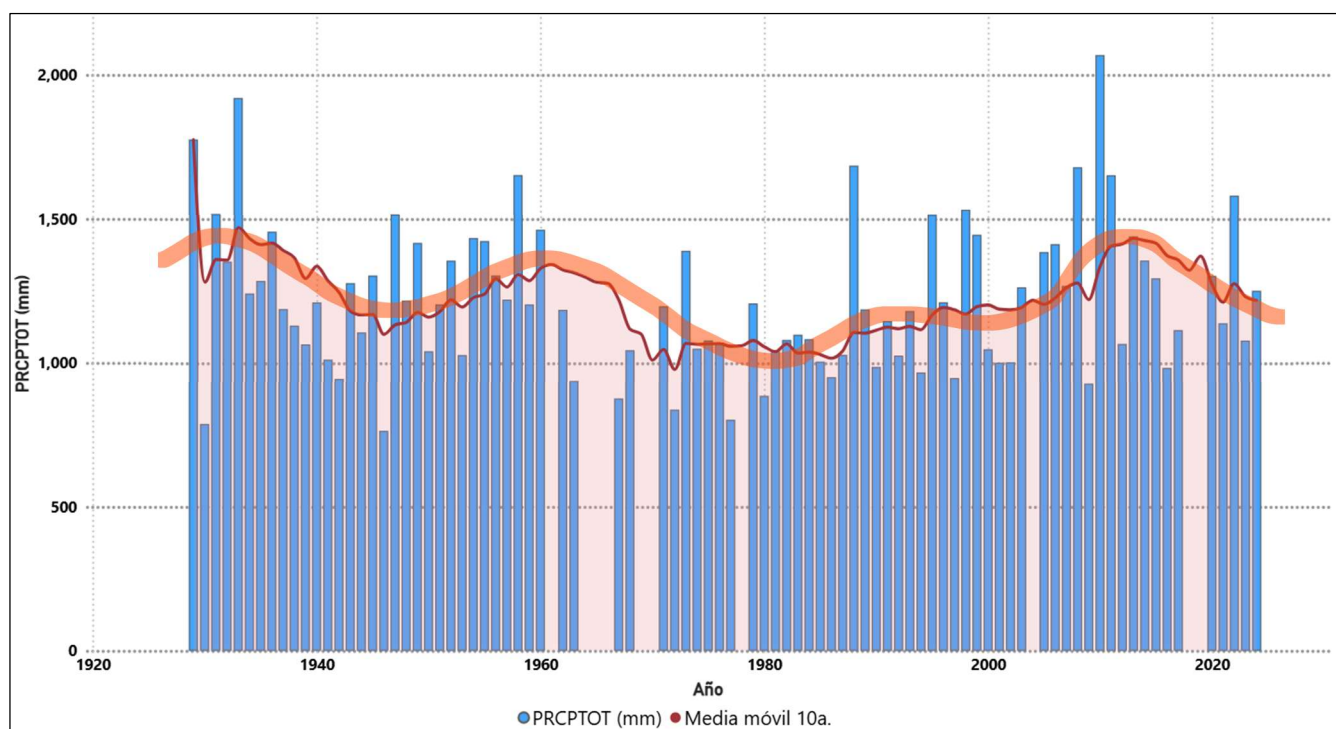


Figura 3. Precipitación total anual en mm. (barras azules) y media móvil de 10 años (línea roja) en la estación INSIVUMEH, 1926–2024. **Fuente:** elaboración propia con base en registros históricos de INSIVUMEH.

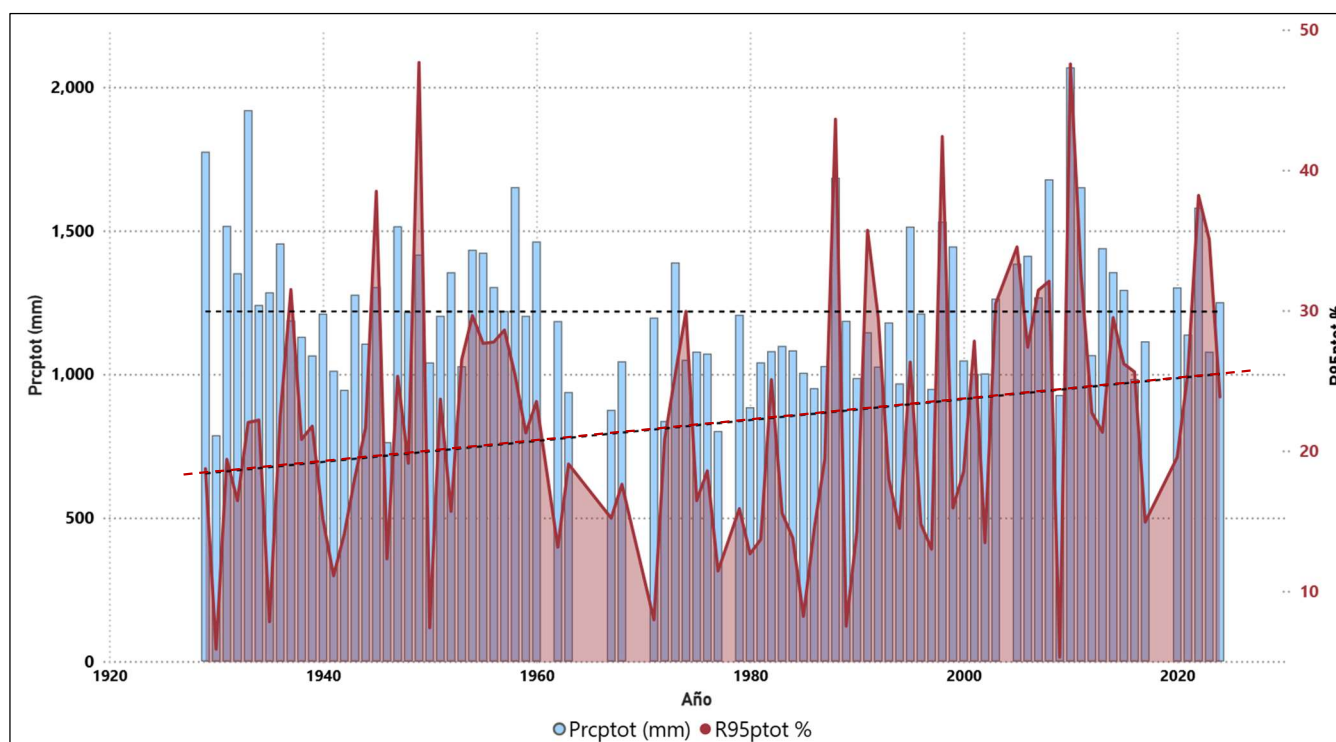


Figura 4. Distribución anual de la precipitación total (PRCPTOT) y fracción anual aportada por días muy lluviosos (R95pTOT) en la estación INSIVUMEH (1926–2024). **Fuente:** elaboración propia con base en registros históricos de INSIVUMEH.

3.3 Mapas de interpolaciones IDW

Para caracterizar los cambios espaciales en la precipitación y temperatura, se generó un conjunto de mapas de tendencia basados en las mejores series históricas de estaciones meteorológicas con registros suficientemente largos y consistentes. Se utilizaron los datos diarios de las estaciones **INSIVUMEH** y **Suiza Contenta** para el periodo **1970–2024**, complementados con la estación **Guatemala Sur**, cuyo registro abarca **1991–2024**.

Esta combinación permitió contar con una aproximación de la variabilidad altitudinal característica del área metropolitana, habilitando una representación espacial más robusta de los cambios en lluvia y temperatura a lo largo de las últimas cinco décadas.

Los mapas fueron elaborados mediante interpolación espacial (IDW), lo que permitió trasladar las tendencias puntuales de cada índice hacia una superficie continua que refleja patrones geográficos de cambio. Este análisis abarca indicadores seleccionados de temperatura (TX90p, TX10p, TN90p, DTR) y de precipitación (PRCPTOT, R95pTOT, R99pTOT, RX1day, RX5Day, SDII); los cuales permiten identificar zonas con intensificación de extremos, cambios en la distribución intraanual y señales espaciales diferenciadas.

entre estaciones que representan sectores de alta urbanización y sectores de menor urbanización y con mayores altitudes (“montanos”). En conjunto, los resultados ofrecen una visión espacial integrada de cómo el clima regional está cambiando y dónde estos cambios son más pronunciados.

3.4 Mapa de precipitación anual IDW

De manera complementaria se hizo un análisis de los últimos 35 años de precipitación de 5 estaciones para el periodo 1990-2024, mediante interpolación IDW. La elaboración del mapa sustenta la necesidad de conocer el comportamiento actual de la lluvia con mayor representación espacial. Como hallazgo se observaron patrones consistentes entre estaciones:

- Máximos de precipitación hacia el sur de la cuenca (zona de influencia alrededor del lago de Amatitlán).
- Valores intermedios en el centro urbano.
- Valores menores hacia el noreste (zonas más áridas por sombra orográfica).

La comparación con los periodos anteriores muestra que **no se identifica un desplazamiento espacial significativo en los centros pluviométricos**, pero sí un incremento en la dispersión de isoyetas intensas, lo cual respalda el hallazgo de que la precipitación extrema se está concentrando más, aunque el total anual no cambie de manera marcada. Esto coincide con la intensificación de eventos R95p y RX1day/RX5day observada en las estaciones urbanas (**Figura 5**).

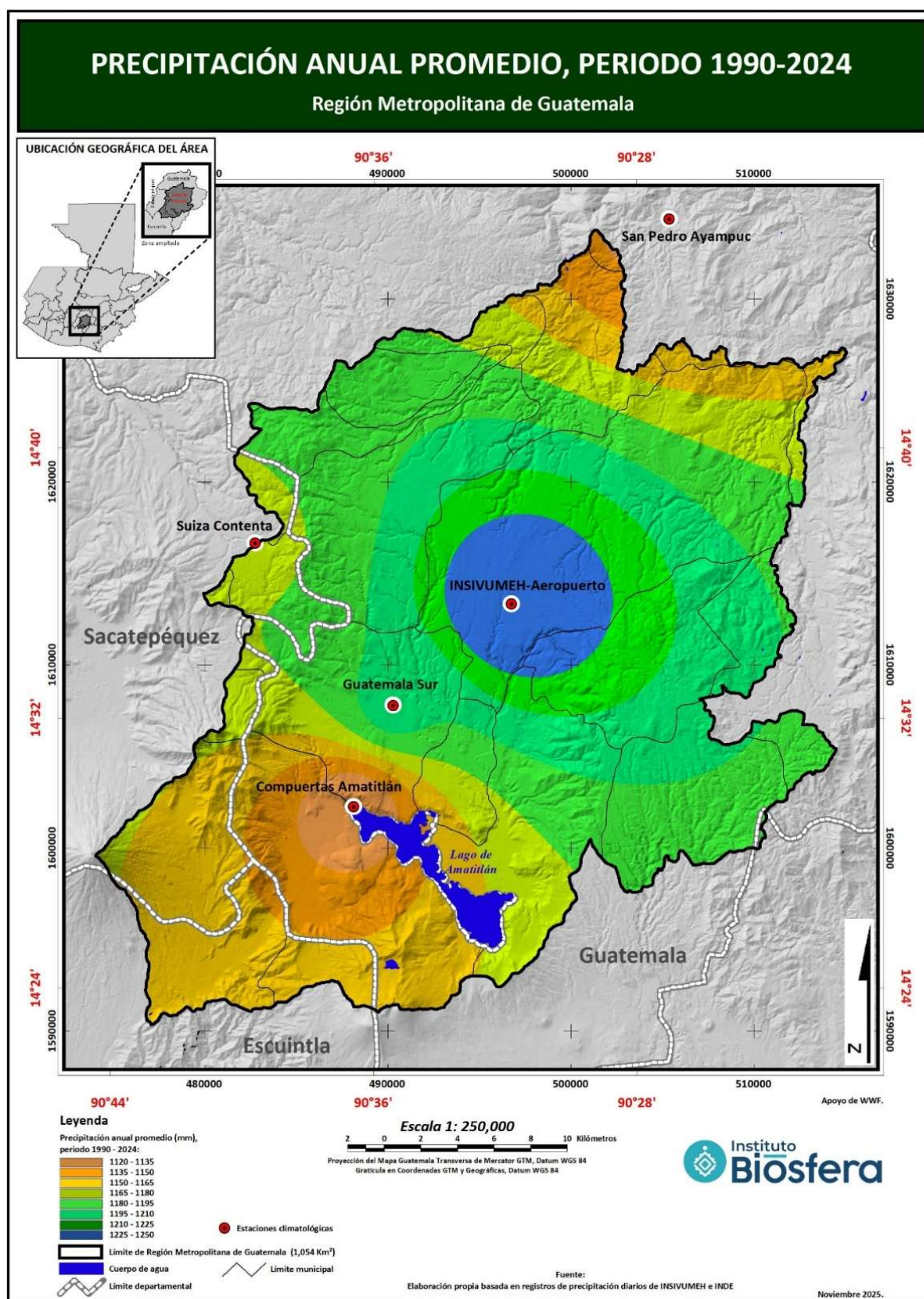


Figura 5. Precipitación anual promedio, periodo 1990-2024.

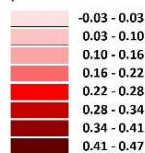
Fuente: Elaboración propia con datos de INDE e INSIVUMEH.

Tendencias de temperatura

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE TX90P, PERIODO 1970-2024

Porcentaje de días cálidos / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice TX90p, periodo 1970-2024:



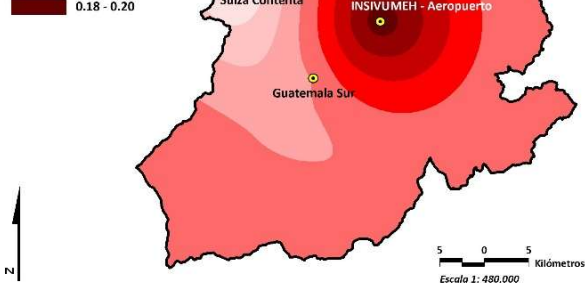
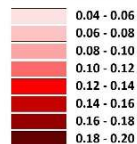
Aumento generalizado de días extremadamente cálidos en toda la región, con el mayor incremento en la periferia occidental (zona Suiza Contenta), donde el calentamiento diurno es más acelerado.

En el núcleo urbano (INSIVUMEH-Aeropuerto) también se observa una tendencia positiva importante, coherente con el efecto de isla de calor.

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE TN90P, PERIODO 1970-2024

Porcentaje de noches cálidas ($T_{min} > p90$) / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice TN90p, periodo 1970-2024:

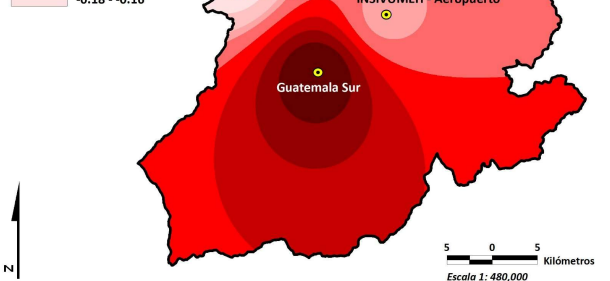
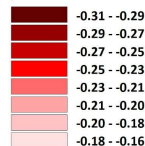


Aumento de noches cálidas, con el núcleo urbano (INSIVUMEH-Aeropuerto) registrando las tendencias más altas, cercanas a 0.18–0.20 %/año. Esto evidencia un calentamiento nocturno significativo, asociado al efecto de isla de calor urbano y a la mayor retención de calor en superficies impermeables. Las zonas perimontanas, como Suiza Contenta, presentan incrementos más moderados, mientras que el sector sur muestra la señal más débil. En conjunto, el patrón indica que las noches extremadamente cálidas son cada vez más frecuentes, reduciendo el enfriamiento nocturno.

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE TX10P, PERIODO 1970-2024

Porcentaje de días fríos / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice TX10p, periodo 1970-2024:

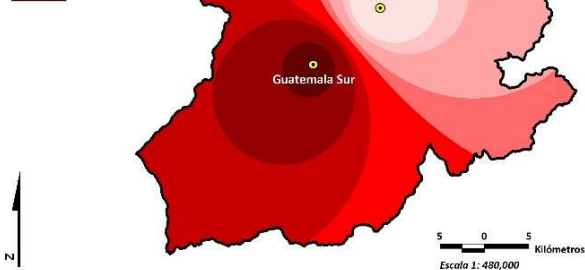
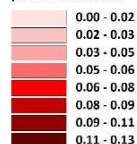


Disminución de días fríos en toda la región, con reducciones aproximadas de -1.6 a -3.1 puntos porcentuales por década. El patrón es más marcado hacia el sector sur metropolitano y también evidente en el núcleo urbano central, donde la pérdida de enfriamiento diurno refleja una señal consistente de calentamiento regional. En conjunto, el territorio experimenta una pérdida generalizada de días fríos, señal clara del **avance del calentamiento diurno**.

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE DTR, PERIODO 1970-2024

Rango Diurno de Temperatura ($T_{max} - T_{min}$) / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice DTR, periodo 1970-2024:



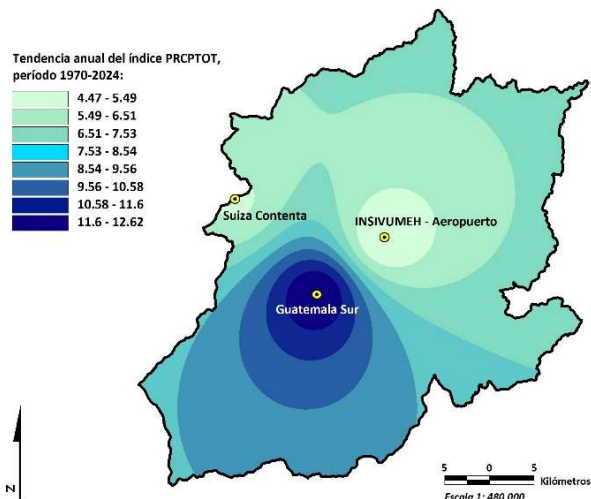
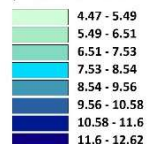
Tendencias positivas se observan en Guatemala Sur, donde el DTR aumenta entre 0.9 y 1.3 °C/década, evidenciando un **calentamiento diurno más marcado**. En Suiza C. las tendencias también son altas, mientras que el núcleo urbano presenta incrementos más moderados por la influencia del calor nocturno urbano. El patrón sugiere que el **calentamiento se expresa principalmente durante el día**, reforzando la intensidad de la radiación y modificando el equilibrio térmico regional.

Tendencias de precipitación

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE PRCPTOT, PERIODO 1970-2024

Total de precipitación anual en días "húmedos" (RR ≥ 1 mm) / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice PRCPTOT, período 1970-2024:

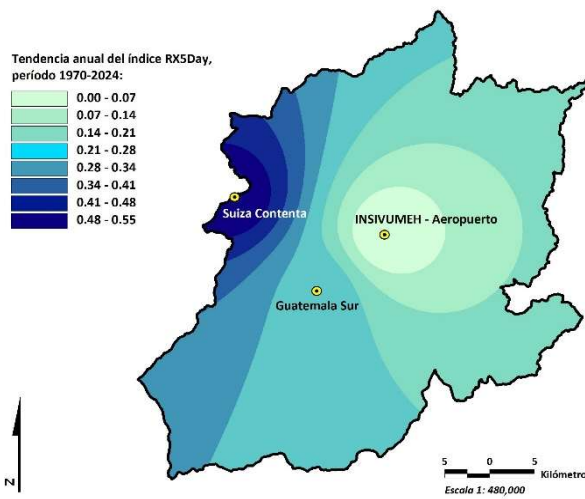
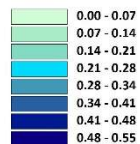


Incremento moderado pero consistente del total de precipitación anual. Las mayores tendencias positivas se concentran especialmente alrededor de Guatemala Sur, donde los aumentos superan los 100–120 mm/década. En cambio, el núcleo urbano (INSIVUMEH-Aeropuerto) y la periferia occidental (Suiza Contenta) presentan incrementos alrededor de 50 mm/década. En conjunto, el patrón indica que, aunque la lluvia total no muestra incrementos abruptos.

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE RX5DAY, PERIODO 1970-2024

Máximo en 5 días consecutivos (mm) / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice RX5Day, período 1970-2024:

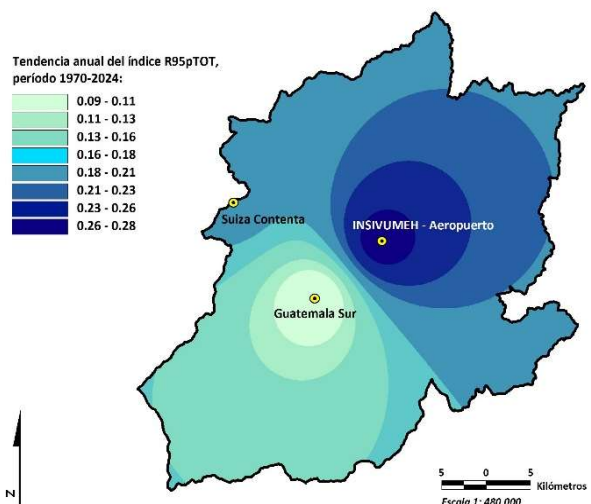
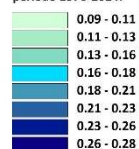


Aumento significativo en el máximo de precipitación acumulada en 5 días consecutivos en la Región Metropolitana de Guatemala. La señal más intensa se observa en la periferia occidental, especialmente en el entorno de Suiza Contenta, donde las tendencias superan los 0.48–0.55 mm/año, indicando una creciente propensión a eventos multidiarios intensos. El núcleo urbano (INSIVUMEH-Aeropuerto) presenta incrementos moderados, mientras que el sector sur muestra la señal más suave. En conjunto, el patrón evidencia que los episodios prolongados de lluvia fuerte son cada vez más recurrentes.

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE R95PTOT, PERIODO 1970-2024

Total anual de precipitación en días "muy húmedos" / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice R95pTOT, período 1970-2024:

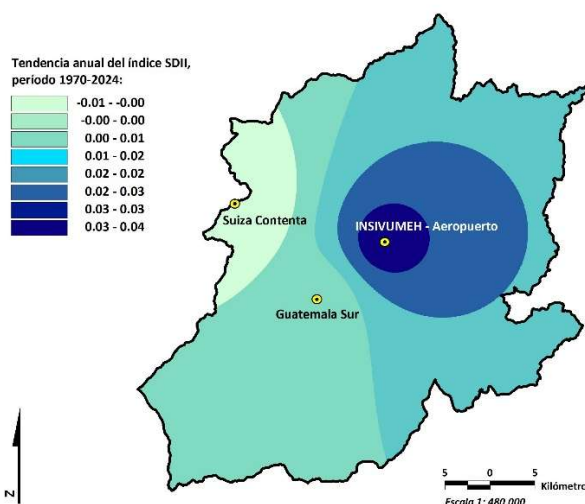
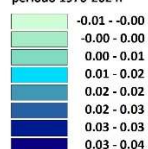


Aumento en la cantidad de lluvia proveniente de eventos muy húmedos (percentil 95). El núcleo urbano —particularmente el entorno de la estación INSIVUMEH-Aeropuerto— presenta las tendencias más altas (2.3–2.8%/década), evidenciando una intensificación de las lluvias extremas de corta duración. La periferia occidental (Suiza Contenta) muestra incrementos moderados, mientras que el sector sur registra la señal más débil. En conjunto, el patrón indica que los **eventos de lluvia muy intensa están aumentando en términos de aporte hídrico**.

TENDENCIA ANUAL DEL ÍNDICE SDII, PERIODO 1970-2024

Índice simple de intensidad = PRCPTOT / No. de días húmedos (mm/día) / Región Metropolitana de Guatemala

Tendencia anual del índice SDII, período 1970-2024:



Incremento moderado en la intensidad de la lluvia en días húmedos. El núcleo urbano (INSIVUMEH-Aeropuerto) muestra las tendencias más altas (0.03–0.04 mm/día por año), lo que indica que, aunque llueva un número similar de días, **cada evento tiende a ser más intenso**. La periferia occidental (Suiza Contenta) presenta incrementos débiles o cercanos a cero, mientras que el sector sur muestra un aumento intermedio. En conjunto, el patrón sugiere que la región está experimentando **eventos de lluvia más concentrados**.

La combinación de **calentamiento sostenido**, mayor frecuencia de **noches cálidas**, y creciente **concentración de la lluvia en eventos extremos** tiene implicaciones directas para la gestión urbana, la infraestructura y la seguridad hídrica. El aumento en RX1day/RX5day incrementa el riesgo de inundaciones rápidas en áreas urbanas impermeabilizadas, mientras que en laderas incrementa la probabilidad de deslizamientos. La mayor irregularidad en la precipitación — lluvias intensas cortas intercaladas con periodos secos— reduce la eficiencia de infiltración hacia los acuíferos, agravando el déficit estructural documentado para el acuífero metropolitano (EMPAGUA, 2024; Samayoa, 2013).

El aumento en temperaturas extremas incide en la demanda energética, la salud pública (riesgo de estrés térmico, especialmente nocturno), y la habitabilidad urbana. La presencia emergente de noches tropicales en la estación INSIVUMEH es un indicador crítico de la evolución del microclima urbano, con efectos potenciales sobre morbilidad y confort térmico.

Desde la perspectiva de gestión del riesgo, la mayor concentración de lluvias en septiembre–octubre exige actualizar protocolos de respuesta, dimensionamiento de drenajes y estrategias de limpieza preventiva. Los resultados refuerzan la necesidad de **soluciones basadas en naturaleza**, conservación de zonas de recarga y fortalecimiento de sistemas de alerta temprana basados en índices climáticos extremos.

Finalmente, se elaboró un cuadro de implicaciones prácticas de algunos índices clave por estación (Tabla 3), útil para los tomadores de decisión en la planificación metropolitana:

Tabla 3. Índices climáticos destacados y sus implicaciones operativas en la gestión metropolitana.

Índice (variable)	Interpretación/Usos prácticos en gestión local
INSIVUMEH	
PRCPTOT (lluvia total anual/mensual)	La precipitación total anual muestra una tendencia de +4.47 mm/año ; aunque la señal es débil, años o meses muy lluviosos indican necesidad de reforzar limpieza de drenajes, manejo de escorrentías y dimensionamiento de obras pluviales.
R95pTOT / R99pTOT (% lluvia extrema anual)	Porcentaje del total anual caído en eventos muy húmedos y extremadamente húmedos. En INSIVUMEH, R95pTOT aumenta +0.28 puntos porcentuales por año ; implica mayor concentración de lluvia en eventos intensos y eleva el riesgo de inundaciones por episodios concentrados. Orienta la activación de planes de emergencia en temporada de huracanes.
RX5day (mm en 5 días, anual/mensual)	Picos de lluvia en periodos multidiarios. En INSIVUMEH, RX5day aumenta +0.87 mm/año , junto con el incremento de RX1day, refleja una mayor severidad de eventos concentrados, con riesgo de desborde de drenajes, saturación de suelos y colapso temporal del sistema pluvial.
R20mm / R30mm (días $\geq 20/\geq 30$ mm por mes)	Frecuencia de eventos fuertes por mes. Aunque R20mm no muestra una tendencia robusta , sigue siendo útil como indicador operativo: meses con muchos días ≥ 20 mm o ≥ 30 mm requieren intensificar mantenimiento preventivo, limpieza de alcantarillas y vigilancia de puntos críticos.
SDII (intensidad media de lluvia)	Lluvias más intensas (SDII alta) sugieren que aunque no aumente el total anual, la lluvia cae en menos tiempo, lo que indica posible sobrecarga de alcantarillado. Señala necesidad de mejorar capacidad de captación o ampliar alcantarillas.
TR20 (noches tropicales)	Aunque el valor de este índice es 0 en la mayoría de décadas (ninguna noche $>20^\circ\text{C}$), su aparición de 1 a 5 noches por año a partir del 2010, puede ser indicador de fuerte efecto de calor nocturno de la ciudad.
SAN PEDRO	
RX5day (mm en 5 días, anual/mensual)	Acumulados altos en pocos días saturan suelos en laderas. Si un mes excede cierto umbral (ej. >150 mm en 5 días), activar vigilancia de taludes y protocolos de evacuación preventiva en comunidades en pendiente.
CWD (racha húmeda, días)	Duración de periodos lluviosos continuos. Rachas $\geq 5-7$ días de lluvia continua predisponen a derrumbes y deslaves. Al superarse estos umbrales se recomienda restricción preventiva en rutas vulnerables y monitoreo geotécnico.
SUIZA CONTENTA	
TX90p / TX10p (% días cálidos/fríos)	Indican el nivel de calor diurno anómalo. Aumento de TX90p sugiere posibles afectaciones a salud (golpes de calor) y agricultura local. Planificar campañas de arborización para proveer sombra y enfriamiento.
DTR (rango diurno de temp.)	Un DTR en aumento significa días más calientes sin un incremento equivalente del enfriamiento nocturno. En Suiza Contenta, el DTR aumenta casi +0.93 °C por década , señal de calentamiento diurno marcado. Esto puede incrementar estrés hídrico en plantas, modificar la demanda de riego y reforzar la necesidad de sombra, arborización y manejo de humedad en áreas periurbanas.

Entre las **limitaciones del estudio**, cabe mencionar que algunas series de datos contienen brechas (especialmente en los años 1970s de ciertas estaciones) que debieron ser interpoladas o dejadas fuera de cálculos de tendencia, lo que introduce incertidumbre.

No obstante, las señales más relevantes no solo son consistentes, sino también estadísticamente robustas: aumentan los días cálidos (TX90p), disminuyen los días fríos (TX10p) y crece la proporción de lluvia asociada a días muy húmedos (R95pTOT). Que estas tendencias se mantengan significativas pese a la presencia de datos faltantes refuerza la solidez del patrón identificado.

Otra limitación es la representatividad espacial: las estaciones puntuales pueden no captar microclimas de áreas específicas (ej. zonas industriales más cálidas, áreas boscosas más frescas). Idealmente se complementaría con datos satelitales o modelos de alta resolución para mapear variaciones intra-urbanas.

Tampoco se abordó en profundidad la influencia de cambios en uso del suelo fuera de la estación (por ejemplo, la estación INSIVUMEH ha visto crecer la mancha urbana a su alrededor, lo cual en sí altera su registro). Pese a ello, la consistencia de los resultados con la física esperada y con estudios independientes da confianza en las conclusiones generales.

5. Conclusiones

- **Temperatura**

El análisis térmico muestra diferencias entre estaciones. En la estación urbana INSIVUMEH (~1500 msnm), el calentamiento es más intenso y abarca tanto el día como la noche: la temperatura media del aire aumenta aproximadamente $+0.025$ °C/año y los índices de extremos térmicos indican un incremento sostenido de días y noches cálidas (TX90p $+0.306$ %/año; TN90p $+0.385$ %/año) y una disminución de días y noches frías (TX10p -0.200 %/año; TN10p -0.244 %/año; $p < 0.001$).

En contraste, en la estación de montaña Suiza Contenta (~2100 m) el calentamiento se manifiesta principalmente en las temperaturas máximas diurnas (TX90p en aumento, TX10p en descenso, DTR al alza), mientras que los extremos nocturnos no muestran cambios estadísticamente significativos. San Pedro Ayampuc presenta una señal intermedia, con indicios de calentamiento, pero con mayor ruido por brechas de datos.

- **Precipitación (cantidad total vs eventos extremos)**

En el componente pluviométrico, las diferencias entre área urbana y periurbana no se expresan tanto en la cantidad total anual como en la forma en que se concentra la lluvia. En las tres estaciones analizadas (INSIVUMEH, Suiza Contenta y San Pedro Ayampuc), el total anual de precipitación (PRCPTOT) no presenta una tendencia robusta, manteniéndose dentro de un rango medio de ~1250–1450 mm/año, con fuerte variabilidad interanual modulada por ENSO y otros forzantes de gran escala.

En INSIVUMEH se detecta un incremento estadísticamente significativo de alrededor de $+4.5$ mm/año, mientras que en Suiza Contenta y San Pedro Ayampuc las tendencias lineales de PRCPTOT no son significativas. Sin embargo, en el entorno urbano central se observa una intensificación clara de los eventos extremos: la fracción de lluvia anual aportada por días muy húmedos (R95pTOT) aumenta de ~24–26 % en los años setenta a ~35–40 % en la actualidad, con una pendiente de $+0.28$ puntos (2.8 por década) ($p < 0.01$), y los máximos anuales RX1day

y RX5day muestran incrementos de +0.43 y +0.87 mm/año, respectivamente ($p < 0.05$). En Suiza Contenta y San Pedro Ayampuc, los índices de eventos intensos permanecen dentro de la variabilidad natural, con señales de aumento más débiles o no significativas, aunque en años específicos se registran rachas húmedas prolongadas (CWD) relevantes para deslizamientos.

En síntesis, el régimen de lluvia total no cambia de forma drástica, pero en el área urbana se concentra cada vez más en pocos eventos muy intensos, mientras que las zonas periurbanas mantienen un régimen extremo asociado sobre todo a la orografía y a la variabilidad climática natural.

- **Implicaciones en el contexto de cambio climático**

La combinación de aumento sostenido de las temperaturas y mayor concentración de la precipitación en eventos intensos constituye una señal coherente de cambio climático localmente detectable, más marcada en el núcleo urbano que en las periferias de montaña.

En el área urbana, el calentamiento día-noche, la aparición reciente de noches tropicales (TR20 > 0 a partir de 2010) y el incremento de R95pTOT, RX1day y RX5day son consistentes con los patrones descritos por el IPCC para ciudades de clima tropical y subtropical, donde la influencia antropogénica intensifica extremos térmicos y pluviométricos.

De manera complementaria, la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático en Guatemala identifica al Área Metropolitana como un territorio altamente expuesto a olas de calor, lluvias extremas e inundaciones repentinas, reforzando que estos cambios observados a nivel local forman parte de una tendencia de riesgo climático ya reconocida a escala nacional (MARN et al., 2021, Cap. 4).

En las zonas de mayor altitud, el calentamiento diurno y la persistencia de eventos lluviosos intensos sugieren un acoplamiento entre el cambio climático de gran escala y las particularidades topográficas de la región. De forma general, el Área Metropolitana de Guatemala transita hacia un clima más cálido y con episodios de lluvia más extremos, sin un aumento compensatorio del volumen anual de precipitación, lo que agrava la presión sobre el acuífero, la infraestructura urbana y la gestión del riesgo de desastres.

6. Lineamientos Estratégicos para la Gestión Climática y la Seguridad Hídrica Metropolitana

- **Fortalecimiento del monitoreo climático urbano y periurbano**

Es prioritario consolidar y ampliar la red de estaciones meteorológicas en el área metropolitana, incorporando más puntos de medición en barrios urbanos densos y en zonas periurbanas críticas (laderas inestables, áreas de recarga hídrica). Se recomienda mantener series continuas de temperatura y precipitación, integrar índices de extremos (TX90p, TN90p, R95pTOT, RX5day, CWD, TR20) en un sistema de vigilancia climática y vincularlos a umbrales operativos para salud, drenaje y protección civil.

- **Planificación urbana adaptativa y mitigación del calor**

Dado el calentamiento más intenso en el núcleo urbano, se sugiere incorporar explícitamente los hallazgos térmicos en el ordenamiento territorial y la normativa de construcción: incremento de áreas verdes y corredores bioclimáticos que atenuen la isla de calor, protección de parques como “islas frescas” y uso de materiales y diseños urbanos que reduzcan la acumulación de calor. Estas medidas deben priorizarse en sectores de alta densidad poblacional y vulnerabilidad socioeconómica, donde el estrés térmico y la demanda energética serán mayores.

- **Gestión integral de la precipitación extrema y drenaje pluvial**

El aumento de la intensidad de los eventos de lluvia, especialmente en septiembre–octubre, exige revisar el diseño de la infraestructura de drenaje pluvial y de control de escorrentías. Se recomienda dimensionar alcantarillas, colectores y estructuras de retención considerando los nuevos niveles de RX1day y RX5day, así como promover soluciones basadas en la naturaleza (humedales urbanos, zanjas de infiltración, pavimentos permeables) que favorezcan la infiltración y reduzcan picos de caudal. En laderas periurbanas, los índices CWD y RX5day deben utilizarse como referencia para establecer umbrales de alerta por deslizamientos y para orientar el manejo de taludes y obras de contención.

- **Gestión hídrica y protección del acuífero metropolitano**

La ausencia de aumentos significativos en el volumen anual de lluvia, junto con su concentración en pocos eventos intensos, refuerza la necesidad de una gestión hídrica más estratégica. Es indispensable proteger las zonas de recarga en la periferia montañosa, frenar la urbanización sobre suelos de alta infiltración y promover la recarga inducida en época lluviosa. La captación de agua de lluvia a escala de edificio y barrio, combinada con un control más estricto de la extracción de aguas subterráneas, puede contribuir a disminuir el déficit anual del acuífero y a mejorar la resiliencia hídrica metropolitana.

- **Ordenamiento territorial y gestión del riesgo de desastres**

Los cambios observados justifican la actualización de instrumentos de planificación territorial y de gestión del riesgo. Se recomienda incorporar mapas de amenaza basados en índices extremos de lluvia y temperatura, ajustar códigos y normas para infraestructuras críticas (drenajes, puentes, taludes, redes viales) a escenarios con eventos más intensos, e integrar estos criterios en planes municipales y metropolitanos. San Pedro Ayampuc y otras zonas de ladera deben ser consideradas “estaciones centinela” para la activación temprana de protocolos ante rachas húmedas prolongadas y acumulados extremos de lluvia.

- **Educación, comunicación y participación comunitaria**

Finalmente, es fundamental traducir estos resultados técnicos en mensajes claros para la población, instituciones y sectores productivos. Programas de educación climática pueden fortalecer la percepción del riesgo asociado a olas de calor, inundaciones súbitas y deslizamientos, promoviendo acciones como el mantenimiento comunitario de drenajes, la protección de áreas verdes y la preparación de planes familiares de emergencia. La

participación social informada facilitará la implementación de medidas de adaptación y reducción del riesgo alineadas con la evidencia climática generada por este estudio.

En síntesis, el clima metropolitano de Guatemala muestra un proceso de intensificación térmica e hidrológica, con consecuencias directas para la seguridad hídrica, la salud pública, la infraestructura urbana y la gestión del riesgo. La mayor frecuencia de temperaturas elevadas y la creciente concentración de la precipitación en eventos extremos incrementan la exposición de la población a olas de calor nocturnas, inundaciones locales, desbordamientos y deslizamientos en un territorio altamente urbanizado. En este contexto, la consolidación de una red de observación continua, el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana y el uso sistemático de índices climáticos se vuelven esenciales para orientar políticas de ordenamiento territorial, adaptación y reducción del riesgo de desastres basadas en evidencia científica.

7. Referencias

- Aguilar, E., Peterson, T. C., Obando, P. R., et al. (2005). *Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D23). <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). *Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes*. *Science*, 321(5895), 1481–1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
- American Meteorological Society. (s. f.). *Teleconnection*. En *Glossary of Meteorology*. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/teleconnection/>
- Batz Cotill, J. E. (2023). *Influencia de la orografía del territorio guatemalteco en la canícula* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Celada, C., Reyes, L., & Santos, M. (2020). *Diagnóstico hidrogeológico de la región metropolitana de Guatemala*. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC).
- Climpact Team. (2020). *Climpact: Climate indices for monitoring and assessing climate extremes*. <https://climpact-sci.org>
- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). *More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions*. *Nature Climate Change*, 6, 508–513. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>
- Durán-Quesada, A. M., Gimeno, L., Amador, J. A., & Nieto, R. (2017). *Moisture sources for Central America: Variability and links to precipitation patterns*. *Climate Dynamics*, 48, 905–924. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3123-6>

- EMPAGUA. (2024). *Informe técnico de disponibilidad y extracción de aguas subterráneas en el área metropolitana de Guatemala*. Empresa Municipal de Agua de Ciudad de Guatemala.
- ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices). (2009). *Definitions of the 27 core indices*. Pacific Climate Impacts Consortium. https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- IARNA-URL & The Nature Conservancy. (2012). *Estudio de la huella hídrica de la región metropolitana de Guatemala*. Universidad Rafael Landívar.
- IPCC. (2021). Annex VII: Glossary. En *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press (Informe del Grupo de Trabajo I del IPCC AR6).
- LS3-USAC. (2013). *Efecto de isla de calor urbano en parques de la Ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Suelos y Sistemas Sostenibles, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala). (2001). *Fisiografía de la República de Guatemala*. Sección Altiplano Central (valles graben y materiales volcánicos).
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). *The Midsummer Drought over Mexico and Central America*. *Journal of Climate*, 12(6), 1577–1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático [SGCCC], & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2021). *Tercera comunicación nacional sobre cambio climático de Guatemala*. Editorial Universitaria UVG. https://www.marn.gob.gt/wpfd_file/tercera-comunicacion-nacional-sobre-cambio-climatico-2/
- NOAA/NCEI. (2021). Understanding Climate Normals. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.ncei.noaa.gov/news/noaa-delivers-new-us-climate-normals>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Methuen.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203)*. Ginebra: OMM.
- OMM. (2021). Updated 30-year reference period reflects changing climate. Nota de prensa, World Meteorological Organization.
- Pérez, C., Amador, J. A., & Rivera, E. (2014). *Tendencias en la precipitación extrema en Centroamérica y su relación con ENSO*. *Revista Geográfica*, 155, 25–48.
- Ribes, A., et al. (2024). Central American climate extreme trends: A statistical analysis of ETCCDI indices. *International Journal of Climatology*. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.8571>

Samayoa, O. E. (2013). *Estudio hidrogeológico del acuífero metropolitano de Guatemala*. Instituto de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, USAC.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2025). *Mantenerse fresco: cómo pueden las comunidades reducir el efecto de isla de calor*. EPA en español (hoja informativa de mitigación urbana).

Wang, C., & Enfield, D. B. (2001). *The tropical Western Hemisphere warm pool*. *Geophysical Research Letters*, 28(8), 1635–1638. <https://doi.org/10.1029/2000GL011763>
