

# Análisis de Datos Climáticos para Palmira

Fabio Castro-Llanos

2025-03-27

## Introducción

El cambio climático es una de las principales amenazas que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, afectando la disponibilidad de recursos hídricos, los ciclos agrícolas y los ecosistemas en general. En este estudio, se analizó la variabilidad climática en el municipio de Palmira mediante la evaluación de datos espaciales de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima para el escenario de emisión SSP 370 (aunque esta metodología es replicable para otros escenarios SSPs), utilizando 24 Modelos de Circulación General (GCMs).

Los GCMs son herramientas matemáticas que simulan los procesos físicos, químicos y dinámicos de la atmósfera, el océano y la superficie terrestre para proyectar el comportamiento del clima bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Estos modelos varían en su sensibilidad y respuesta a las condiciones climáticas futuras, lo que genera un rango de proyecciones. Analizar la incertidumbre entre distintos GCMs permite identificar cuáles presentan los escenarios más extremos en precipitación y temperatura, información clave para evaluar riesgos climáticos y formular estrategias de adaptación. Además, estos modelos son ampliamente utilizados en estudios ecológicos, como la modelación de distribución de especies de flora y fauna, y en el desarrollo de planes municipales de cambio climático, ya que brindan una base científica para la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales y planificación territorial.

## Metodología

La metodología incluyó la agregación de los datos a nivel anual, aplicando la suma para la precipitación y el promedio para la temperatura mínima y máxima. Posteriormente, se realizaron análisis de incertidumbre para evaluar la variabilidad entre los diferentes GCMs, permitiendo diferenciar la magnitud de los cambios proyectados según cada modelo. Adicionalmente, se generaron mapas espaciales que ilustran los patrones de aumento o disminución de las variables climáticas en la región, proporcionando una visión detallada de los cambios potenciales en el clima de Palmira.

Este tipo de análisis es fundamental para comprender la magnitud y la dirección de los cambios climáticos esperados en escalas locales, lo que resulta clave para la planificación territorial y la toma de decisiones en sectores vulnerables, como la agricultura y la gestión de recursos hídricos. La comparación entre múltiples GCMs permite capturar la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas y brinda información más robusta en la formulación de estrategias de adaptación.

En este sentido, los resultados obtenidos pueden ser utilizados por autoridades locales y planificadores para diseñar políticas de mitigación y adaptación al cambio climático, promoviendo un desarrollo sostenible en la región. Además, este estudio resalta la importancia del uso de RMarkdown y R para el análisis de datos espaciales y la visualización de información climática en formato informe con el apoyo de LaTeX.

## Pasos metodológicos

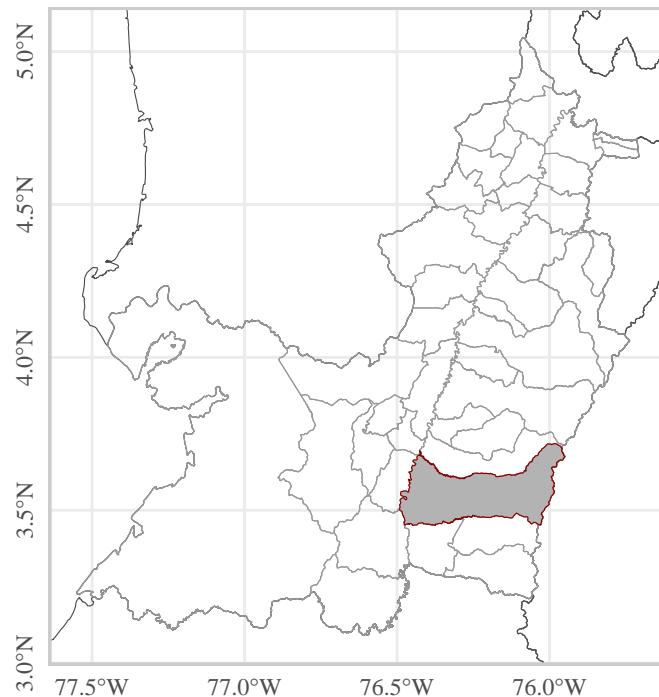
Los pasos seguidos para el análisis se listan a continuación:

1. Descarga de datos climáticos de línea base para precipitación, temperatura mínima y máxima mediante la librería geodata, utilizando la función `worldclim_country`.
2. Descarga de datos climáticos futuros para los diferentes escenarios SSPs (126, 245, 370, 585) y los 24 GCMs disponibles en los servidores de la Universidad de Davis, con la función `cmip6_tile`.
3. Recorte de los datos mediante enmascaramiento para el municipio de Palmira, usando funciones como `crop` y `mask`.
4. Cálculo de estadísticas zonales para todo el municipio, utilizando la función `global` del paquete `terra`.
5. Creación de un gráfico que ilustra el comportamiento de los distintos GCMs en un plano cartesiano, empleando `ggplot2`.
6. Mapeo de los datos de diferencia para las variables climáticas, calculando el promedio de todos los ráster procesados para distintos períodos y utilizando las funciones de `terra` y `ggplot2` para su visualización.

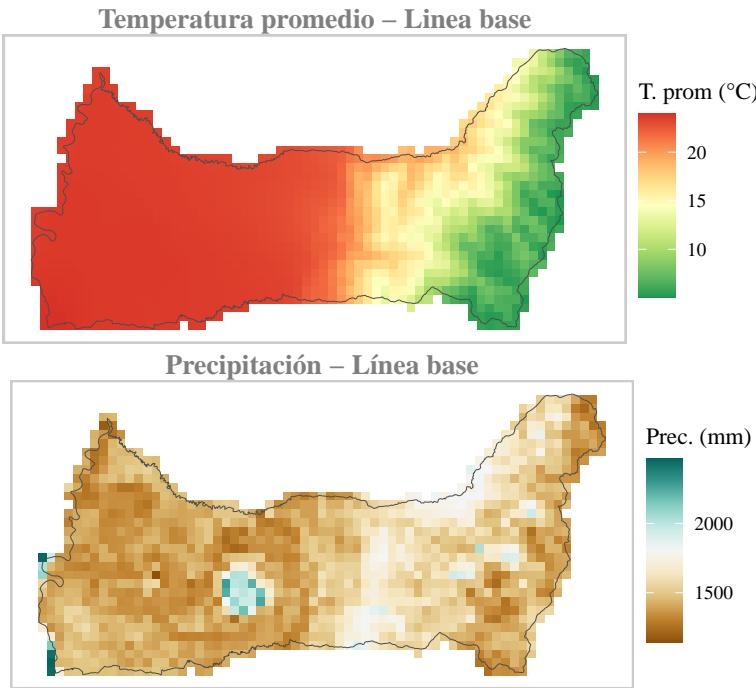
## Resultados

En la siguiente figura se ilustra la ubicación dentro de Palmira dentro del departamento del Valle del Cauca.

**Ubicación de Palmira en el Valle del Cauca**



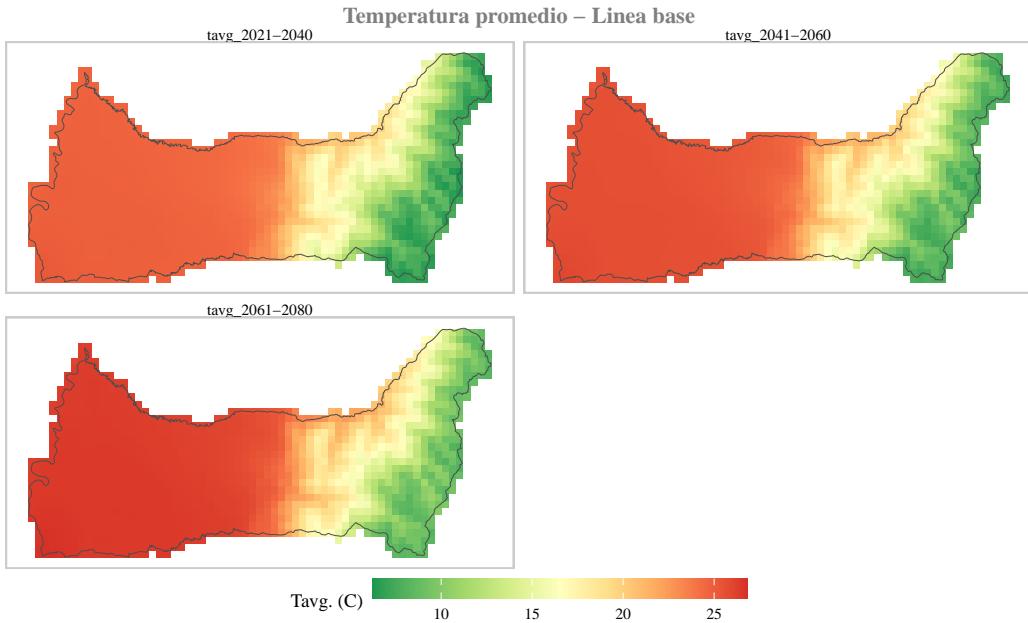
Palmira se ubica al suroriente del departamento del Valle del Cauca y tiene gran parte del territorio plano donde se ocupa principalmente la agricultura con la caña de azúcar, así como también zona montañosa con distintos tipos de ecosistemas incluyendo zonas de páramo; por esta razón se intuye que tendrá gran variedad de climas con temperaturas que pueden ir desde los 5°C hasta los 24°C en las zonas más bajas (valle), así como también una precipitación anual que va desde los 1,100 mm hasta los 2,500 mm (Fick & Hijmans, 2017). En la siguiente figura se ilustra el comportamiento de estas dos variables para el municipio de Palmira, esto según los datos de Worldclim.



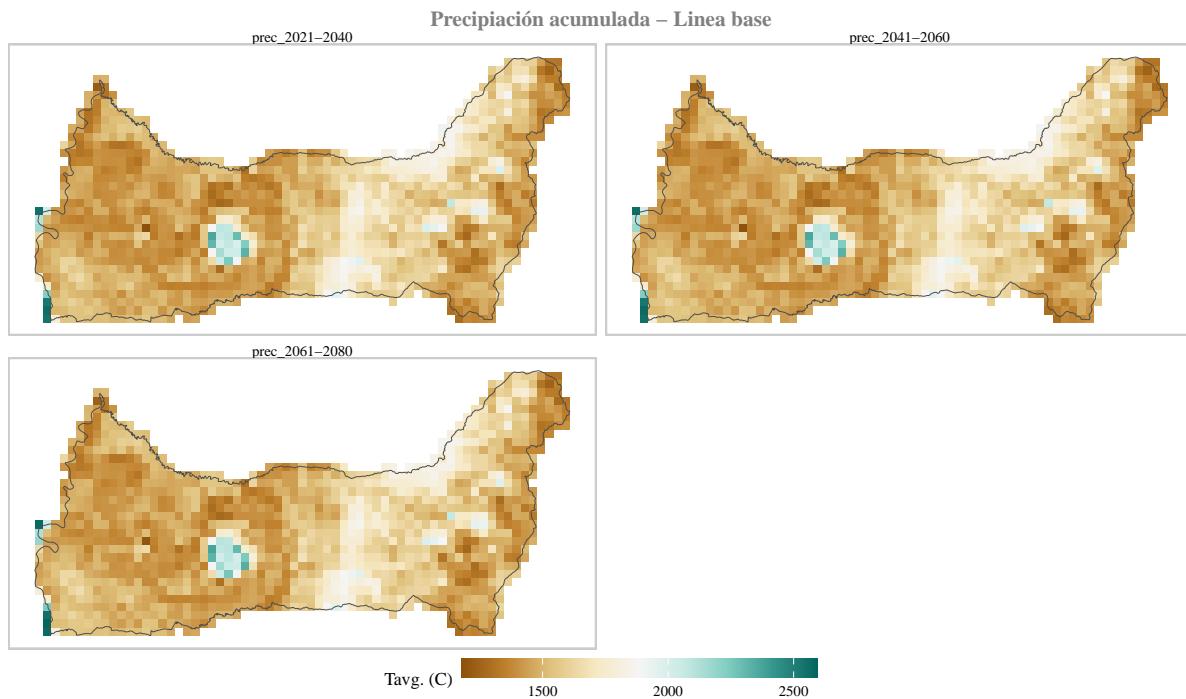
Como se puede visualizar en la anterior figura la zona centro - oeste del municipio se caracteriza por tener las temperaturas más altas con valores por encima de los 20°C, mientras que la zona este, montañosa, se presentan las temperaturas más bajas, hasta por debajo de los 10°C, decir que este municipio tiene grante del Parque Nacional Páramo de las Hermosas. En cuanto a la precipitación se observa que es heterogénea, con zonas de mayor acumulación en sectores puntales como el centro del municipio. Los tonos marrón claro representan áreas con menor precipitación, esta variabilidad espacial se da principalmente por factores geográficos como la influencia de la topografía y la dirección de los vientos provenientes del pacífico colombiano.

Siguiendo con el análisis climático, se descargaron y procesaron los datos de cambio climático para el SSP 370 (de los 4 existentes), describen posibles desarrollos futuros de la sociedad y su impacto de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, estos escenarios están diseñados para complementar los RCPs utilizado en el CMIP5, proporcionando un marco más completo que combina factores socioeconómicos, tecnológicos y políticos con las emisiones proyectadas. Entre las principales características del SSP 370 según el informe del IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático), se encuentran: la alta dependencia de combustibles fósiles, la desigualdad económica en el país, la deforestación y el uso intensivo del suelo, la baja cooperación internacional. la alta radiación forzante (en este escenario es de aproximadamente 7.0 W/m<sup>2</sup>, lo que se traduce en un aumento en la temperatura global de entre 2.8°C y 4.6 °C en comparación con la era pre-industrial).

El análisis de esta información para el municipio de Palmira (y extrapolable a otros) es clave para la planificación proactiva por parte de dirigentes para asegurar planes hidrológicos y de agricultura en favor de la población que allí vive.

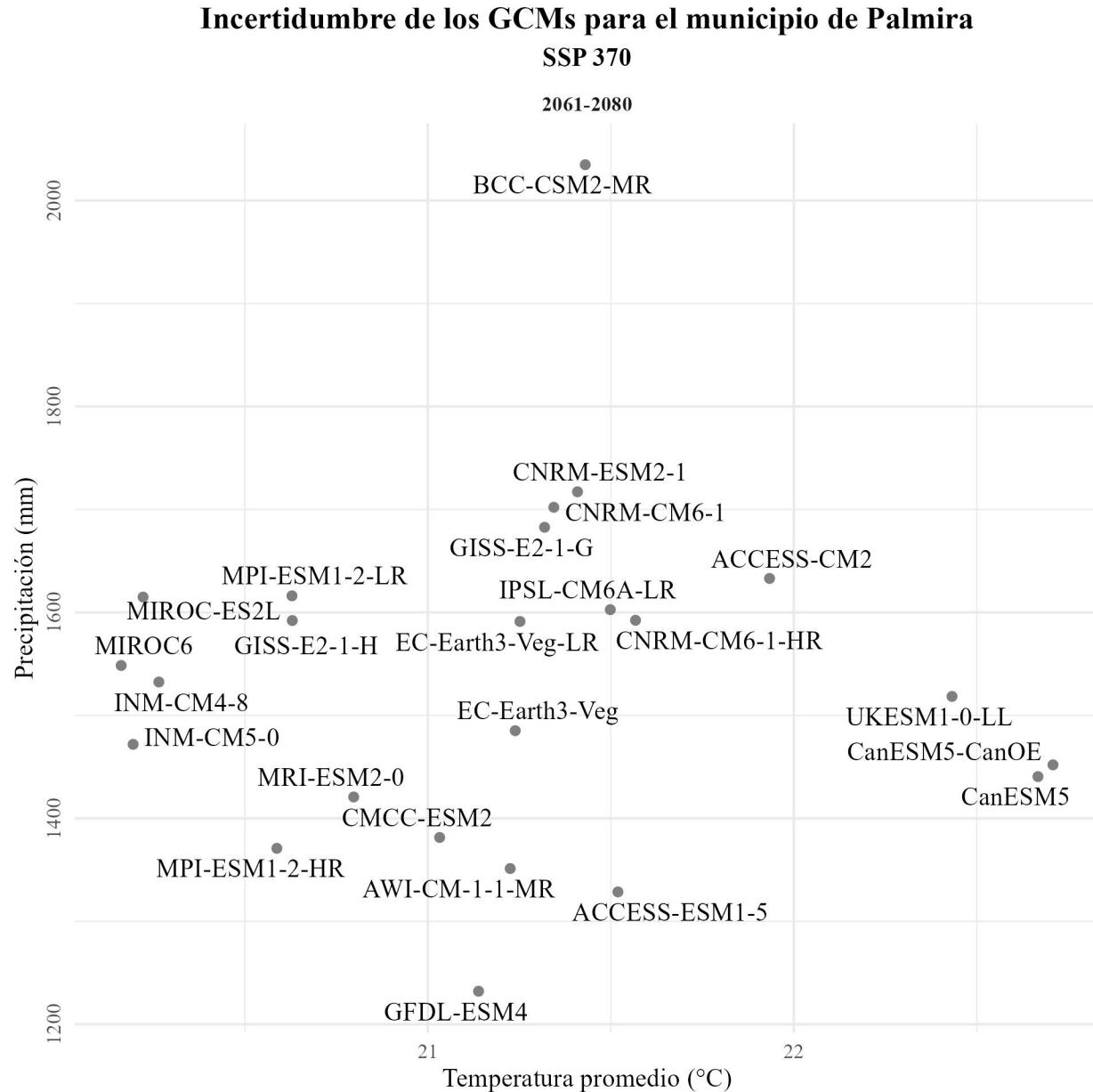


Como se puede observar en la figura se tienen diferencias en la temperatura entre los distintos períodos, resaltándose en este caso el aumento de la variable en la zona plana de Palmira, así como también una reducción en la temperatura para la región montañosa del municipio. Ahora bien, en la siguiente figura se ilustra el comportamiento de la precipitación.



Para la precipitación no se tienen mayor diferencia entre los distintos períodos, esto quizás dado por las fuertes diferencias que se dan entre los GCMs, es decir, algunos modelos indican aumentos y otros reducciones, entonces a la hora de realizar el promedio esto se ve reflejado con diferencias cercanas al 0%; de aquí la importancia de realizar el análisis de GCMs, donde visualizaremos en un plano cartesiano las diferencias de

los modelos. Como ejercicio ilustrativo, en la siguiente figura se presenta el comportamiento de los GCMs para la precipitación y temperatura con el SSP 126 para el periodo 2061-2080.



La figura representa la incertidumbre de los modelos climáticos globales (GCMs) en cuanto a la precipitación y temperatura proyectadas para el municipio de Palmira bajo el escenario de cambio climático SSP 370 en el período 2061-2080. El eje X muestra la temperatura promedio en grados Celsius, mientras que el eje Y representa la precipitación total en milímetros. Cada punto corresponde a un modelo climático, lo que permite visualizar la dispersión en sus proyecciones y la incertidumbre asociada a los distintos GCMs.

En términos de precipitación, los valores proyectados varían entre aproximadamente 1200 mm y 2100 mm, con el modelo BCC-CSM2-MR estimando la mayor cantidad de precipitación, mientras que GFDL-ESM4 proyecta la menor. En cuanto a la temperatura, los modelos fluctúan entre 20.5°C y 22.2°C, con UKESM1-0-LL, CanESM5-CanOE y CanESM5 estimando los valores más altos, mientras que MPI-ESM1-2-HR y AWI-CM-1-1-MR presentan valores más bajos.

Se puede notar una mayor dispersión en comparación con el escenario SSP 126, con una tendencia general al aumento de la temperatura en la mayoría de los modelos. Un grupo significativo de modelos climáticos proyecta valores de precipitación entre 1400 y 1700 mm, lo que sugiere cierta coherencia en sus estimaciones. Sin embargo, existen modelos que se apartan de este rango, como BCC-CSM2-MR, que prevé una mayor precipitación, y GFDL-ESM4, que estima los valores más bajos tanto en precipitación como en temperatura.

Estos resultados evidencian la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas, lo que resalta la necesidad de considerar múltiples modelos al evaluar el impacto del cambio climático en Palmira. En este escenario de mayor emisión de gases de efecto invernadero, se observa un incremento generalizado en la temperatura con una variabilidad considerable en la precipitación, lo que podría tener implicaciones en la disponibilidad de agua y la gestión de recursos hídricos. La variabilidad entre modelos sugiere que es crucial desarrollar estrategias de adaptación que contemplen tanto escenarios más secos como aquellos con precipitaciones extremas.