Gobernación de Cundinamarca

EPC Empresas Públicas de Cundinamarca S.A. E.S.P.

"ACTUALIZACIÓN DE LA FASE I (PREFACTIBILIDAD) A LA ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA, JURÍDICA Y FINANCIERA DE LOS PROCESOS DE PLANIFICACIÓN, VIABILIZACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL ACUEDUCTO REGIONAL DE LA SABANA"



PRODUCTO 3. Análisis hidrológico para identificación y evaluación de fuentes alternas y complementarias de suministro

UT GBG SABANA

BONUS

CONTRATO EPC-PDA-579-2025

CONTROL DE VERSIONES

Versión	Fecha:	Descripción Modificación	Folios
0	17 de julio de 2026	Edición Inicial	120

RESPONSABLES

Aprobado por:	
ING. EUGENIA VILLEGAS BOTERO	
CC. 51.780.785	
TP. 25202-25501 CND	
DIRECTORA DE CONSULTORÍA	
Revisado por:	
ING. DIANA PATRICIA RAMÍREZ ARAGÓN	
C.C 52.769.9738	
TP. 25202-152867	
COORDINADORA DE CONSULTORÍA	

CONTENIDO

1 8
1.1 8
2 8
2.1 8
3 8
3.1 8
4 9
4.1 9
4.1.1 9
4.1.2 11
4.1.3 12
4.1.4 29
4.2 49
4.2.1 50
4.3 86
4.3.1 86
4.3.2 91
4.3.3 92
4.3.4 93
4.3.5 98
4.4 99
4.4.1 99
4.4.2 101
4.4.3 102
4.5 102
4.5.1 103
4.5.2 **¡Error! Marcador no definido.**
4.6 119
4.7 124
4.7.1 125

5 139
5.1 139
5.1.1 139
5.1.2 143
5.1.3 145
5.1.4 145
6 146
7 146

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Criterios para calificación de nivel de consistencia de series hidroclimatológicas 11

Tabla 2. Productos del análisis de consistencia y homogeneidad. 12

Tabla 3. Registros a retirar por outlier regional. 17

Tabla 4. Resumen de clases de independencia serial. 18

Tabla 5. Resumen de resultados de cambio en media. 19

Tabla 6. Resumen de resultados de cambio en varianza. 20

Tabla 7. Resumen de resultados de tendencia. 21

Tabla 8. Resumen de clases SNHT. 21

Tabla 9. Estaciones retiradas por clasificación Insuficiente 25

Tabla 10. Coeficientes de correlación de datos CHIRPS con series originales y después de modificaciones por proceso de consistencia 28

Tabla 11. Resumen general de estaciones y completitud por variable. 30

Tabla 12. Resumen de disponibilidad de vecinas regionales. 34

Tabla 13. Resumen de outliers por variable. 35

Tabla 14. Resumen de resultados de cambio en media. 36

Tabla 15. Resumen de resultados de cambio en varianza. 36

Tabla 16. Resumen de resultados de tendencia. 37

Tabla 17. Estaciones con SNHT significativo por variable. 38

Tabla 18. Registros específicos con inconsistencias físicas entre TMAX, TMED y TMIN. 40

Tabla 19. Clasificación final de estaciones por variable. 42

Tabla 20. Causa clasificación "Insuficiente" por variable. 43

Tabla 21. Acciones aplicadas en la corrección por consistencia. 46

Tabla 22. Efectos de las modificaciones por consistencia en la clasificación de consistencia por variable. 47

Tabla 23. Efectos de las modificaciones por consistencia en las pruebas de consistencia. 48

Tabla 24. Efectos de las modificaciones por consistencia en los estadísticos principales. 49

Tabla 25. Resultados globales por metodología para los once períodos evaluados 56

Tabla 26. Comparación de valores medios en relación al ancho de las bandas 58

Tabla 27. Errores mensuales por método 61

Tabla 28. Resultados promedio por período evaluado 62
Tabla 29. Resultados método Randon Forest, período 30 años 63
Tabla 30. Resumen de los cambios estadísticos en las 96 estaciones 64
Tabla 31. Estaciones que requieren revisión 65
Tabla 32. Cambios reales en los estadísticos de las estaciones en revisión 66
Tabla 33. Resumen de metodologías de completado por variable 71
Tabla 34. Resultados globales por metodología para TMAX 72
Tabla 35. Resultados globales por metodología para TMED 73
Tabla 36. Resultados globales por metodología para TMIN 73
Tabla 37. Resultados globales por metodología para BS 74
Tabla 38. Resultados globales por metodología para HR 75
Tabla 39. Resultados globales por metodología para VV 75
Tabla 40. Resumen de metodologías seleccionadas y métricas de desempeño por variable 76
Tabla 41. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX 81
Tabla 42. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMED 82
Tabla 43. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX 82
Tabla 44. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX 83
Tabla 45. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX 83
Tabla 46. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX 84
Tabla 47. Estaciones que requieren revisión por variable 84
Tabla 48. Variables, covariables y transformaciones aplicadas en la interpolación espacial 90
Tabla 49. Umbrales de incertidumbre para clasificación de confiabilidad 93
Tabla 50. Resumen de métricas de validación por variable 93
Tabla 51. Estadísticos de incertidumbre por variable 95
Tabla 52. Resumen global del análisis de sensibilidad entre métodos 101
Tabla 53. Resultados de la verificación con el paquete FAO56 101
Tabla 54. Descripción parámetros modelo GR4M 108
Tabla 55. Demanda hídrica total por subcuenca y asociación con los nodos subregionales del proyecto (POMCA Río Bogotá 2120 113

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo longitud de series por estación 13

Figura 2. Boxplot mensual del conjunto de estaciones. 14

Figura 3. Boxplot por estación, coloreado por clasificación final. 15

Figura 4. Correlaciones Pearson y Spearman entre estaciones. 16

Figura 5. Resumen de clasificación final (muy útil porque refleja el efecto acumulado del SNHT sobre la clasificación global). 22

Figura 6. Ejemplo de diagnóstico individual por estación (caso ESTACION_2120044). 24

Figura 7. Longitud de series mensuales de temperatura media. 31

Figura 8. Boxplot mensual temperatura media. 32

Figura 9. Boxplot por estación para la temperatura media 33

Figura 10. Ejemplo de diagnóstico individual por estación para la temperatura media en la estación La Iberia (2120548). 39

Figura 11. Comparación de medias mensuales por método de completado 58

Figura 12. Dispersión de sesgo y RMSE por método y período 60

Figura 13. Distribución de errores mensuales por método 61

Figura 14. Comparación de medias mensuales TMAX por método de completado 78

Figura 15. Comparación de medias mensuales TMED por método de completado 78

Figura 16. Comparación de medias mensuales TMIN por método de completado 79

Figura 17. Comparación de medias mensuales BS por método de completado 79

Figura 18. Comparación de medias mensuales HR por método de completado 80

Figura 19. Comparación de medias mensuales VV por método de completado 80

Figura 20. Demanda hídrica agrupada por nodo subregional del proyecto 114

Figura 21. Distribución espacial de la demanda hídrica de cada subcuenca de interés y la ubicación de los diferentes municipios. 115

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO DEL PROYECTO

El proyecto se enmarca en la necesidad de fortalecer y optimizar la prestación del servicio de acueducto en los municipios del área de influencia del Acueducto Regional de la Sabana, los cuales enfrentan desafíos estructurales asociados al crecimiento poblacional, la presión sobre las fuentes de abastecimiento, la fragmentación de los esquemas de prestación, las limitaciones de la infraestructura existente y la creciente exposición a riesgos de origen climático, ambiental y operativo.

En la actualidad, los municipios objeto del proyecto presentan condiciones heterogéneas en términos de cobertura, continuidad, calidad del servicio, capacidad operativa y sostenibilidad financiera, lo que ha derivado en brechas significativas en el acceso al agua potable y en la eficiencia del servicio. Adicionalmente, la planeación y operación individual de los sistemas municipales ha limitado la posibilidad de aprovechar economías de escala, generar esquemas de inversión eficientes y garantizar la resiliencia del abastecimiento frente a escenarios de variabilidad climática y demanda futura.

En este contexto, el proyecto busca evaluar y estructurar una alternativa regional de prestación del servicio de acueducto, sustentada en criterios técnicos, financieros, legales y ambientales, que permita garantizar el acceso al agua potable de manera continua, segura y sostenible en el largo plazo. Para ello, resulta indispensable contar con un diagnóstico integral de la situación actual, que sirva como punto de partida para la toma de decisiones informadas y para la definición de un modelo de intervención acorde con las necesidades del territorio y el marco normativo vigente.

2 OBJETIVO DEL PRODUCTO

Realizar la evaluación hidrológica de las fuentes superficiales de interés mediante la estimación de la oferta hídrica total y disponible, considerando diferentes condiciones hidrológicas y la aplicación de metodologías y modelos hidrológicos técnicamente apropiados, con el fin de identificar y sustentar las fuentes alternas y complementarias que garanticen el abastecimiento del Acueducto Regional de la Sabana.

2.1 ALCANCE DEL PRODUCTO

Para efectos del presente documento, los términos utilizados se interpretan conforme a las definiciones establecidas en el Anexo Técnico del contrato y la normativa vigente del sector de agua potable y saneamiento básico

3 MARCO GENERAL

3.1 ÁREA DE ESTUDIO Y MUNICIPIOS BENEFICIADOS

El área de estudio del Acueducto Regional de la Sabana corresponde al conjunto de municipios localizados en la Sabana de Bogotá y su zona de influencia, definidos dentro del alcance contractual de la Fase I de prefactibilidad, cuyo propósito es evaluar y estructurar un esquema regional de prestación del servicio de acueducto técnica, jurídica y financieramente viable, conforme a la normativa y regulación vigente del sector de agua potable y saneamiento básico.

De acuerdo con el Anexo Técnico, el Proyecto considera un total de dieciséis (16) municipios beneficiados, de los cuales nueve (9) corresponden a los municipios inicialmente incluidos en el contrato PDA-C-252-2015: Sesquilé, Tocancipá, Sopó, Cajicá, Chía, Cota, Madrid, Mosquera y Funza; y siete (7) municipios adicionales incorporados en el alcance actual: Gachancipá, Bojacá, Facatativá, La Calera, Tabio, La Mesa y Anapoima. Estos municipios presentan condiciones diferenciadas en cuanto a cobertura, calidad, continuidad del servicio, fuentes de abastecimiento y capacidad institucional y financie

4 OFERTA HIDRICA

4.1 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y HOMOGENEIDAD DE SERIES HIDROCLIMATOLÓGICAS MENSUALES

En esta sección se explica la metodología empleada para evaluar la calidad, consistencia, homogeneidad regional y aptitud de series mensuales de variables hidroclimatológicas (precipitación, temperaturas, evaporación, etc.). Los resultados permiten clasificar cada estación según su nivel de confiabilidad y orientar la selección de métodos óptimos para completar datos faltantes, extender registros y utilizar las series en balances hídricos e interpolación espacial.

4.1.1 PRUEBAS ESTADÍSTICAS E INTERPRETACIÓN

El análisis se aplica sobre series mensuales estandarizadas (valor_z = (valor - media_mensual) / desviación_estándar_mensual) para eliminar la estacionalidad y evitar conclusiones falsas, siguiendo la práctica habitual en climatología (Wilks, 2011). El nivel de significancia α se fija en 0.05. A continuación se describen las pruebas realizadas y los criterios de interpretación.

- **Independencia serial (autocorrelación):** Se calcula la autocorrelación de lag 1 (rho1), la prueba de Ljung Box (Ljung y Box, 1978) y la prueba de rachas (Wald y Wolfowitz, 1940).
  La independencia se considera alta cuando el p valor es superior a 0.05 y |rho1| < 0.2, lo que indica ausencia de dependencia significativa. Es moderada si el p valor es ≤ 0.05 pero |rho1| < 0.4, o si las rachas son moderadas. Es baja cuando el p valor ≤ 0.05 y |rho1| ≥ 0.4, evidenciando una fuerte dependencia serial.
- **Cambio en la media:** Se emplean la prueba de Pettitt (1979) para detectar un punto de cambio único y la prueba de Mann Whitney (Mann y Whitney, 1947) para comparar dos periodos (antes y después del punto estimado o división en mitades). La magnitud se expresa como la diferencia de medias en unidades originales y su relación con la desviación estándar, siguiendo los criterios de magnitud propuestos por Yevjevich (1972).
  No hay cambio significativo (clase Alta) cuando el p valor > 0.05. El cambio es moderado si p valor ≤ 0.05 pero la diferencia absoluta de medias es menor a 0.5 veces la desviación estándar. Es bajo (cambio sustancial) cuando p valor ≤ 0.05 y la diferencia absoluta es ≥ 0.5 veces la desviación estándar.
- **Cambio en la varianza:** Se utiliza la prueba de Levene (Levene, 1960), robusta y sin supuestos de normalidad. La magnitud se resume mediante el cociente de desviaciones estándar entre dos periodos (ratio_sd = sd_periodo2 / sd_periodo1). Con base en los umbrales recomendados por Yevjevich (1972), la varianza es estable (Alta) si p valor > 0.05. Es moderada si p valor ≤ 0.05 y el cociente se

encuentra entre 0.5 y 2. Es baja (cambio fuerte) cuando p valor ≤ 0.05 y el cociente es menor a 0.5 o mayor a 2.

- **Tendencia:** Se aplica la prueba de Mann Kendall estacional (Hirsch, Slack y Smith, 1982), diseñada específicamente para series con estacionalidad, no paramétrica y robusta ante datos faltantes. La magnitud se estima con la pendiente de Sen (Sen, 1968) (unidades/año) y la pendiente relativa porcentual (pendiente dividida por la mediana histórica, multiplicada por 100).
  Siguiendo las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial para estudios de detección de cambio climático (WMO, 2017), no existe tendencia significativa (Alta) si el p valor > 0.05 o la pendiente relativa es inferior al 5%. La tendencia es moderada si p valor ≤ 0.05 y la pendiente relativa se sitúa entre 5% y 10%. Es baja (tendencia fuerte) cuando p valor ≤ 0.05 y la pendiente relativa supera el 10%.

- **Homogeneidad regional (SNHT relativa):** Para cada estación candidata se construye una serie de referencia regional a partir de las estaciones vecinas con alta correlación, distancia geográfica razonable, diferencia altitudinal moderada y suficientes meses comunes, excluyendo siempre la propia candidata (Alexandersson, 1986). La referencia es la mediana (o media) de esas vecinas. Para precipitación se usa el cociente (candidata / referencia); para temperatura la diferencia (candidata – referencia). Sobre la serie relativa, previamente estandarizada mensualmente, se aplica el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) desarrollado por Alexandersson (1986).
  La homogeneidad es alta (sin evidencia de punto de cambio) cuando el p valor > 0.05. Es moderada (evidencia débil) si 0.01 < p valor ≤ 0.05. Es baja (evidencia clara de inhomogeneidad) cuando p valor ≤ 0.01. Si no hay suficientes vecinas o datos comunes, la prueba se declara no aplicable.

- **Outliers:** En el control de valores anómalos o outliers, se emplean cuatro criterios complementarios, sin eliminar datos automáticamente:
  - Climatol (Guijarro, 2026). Detecta valores atípicos u outliers de manera contextual o regional comparando cada estación con sus vecinas más cercanas, en lugar de hacerlo de forma aislada
  - Rango físico: marca valores imposibles o físicamente no razonables según la variable. Para precipitación y evaporación no se permiten valores negativos; la temperatura permite negativos pero valida contra rangos configurables; otras variables usan el rango definido en la configuración.
  - Extremo mensual por IQR (rango intercuartil): para cada estación y mes se calculan los cuantiles Q1, Q3, siendo IQR = Q3 - Q1. Se marca como extremo si el dato supera el límite superior = Q3 + k * IQR. Para precipitación y evaporación, el límite inferior se controla con el rango físico, evitando negativos. Los valores de k configurados son: precipitación k = 4.0, temperatura k = 3.0, otras variables k = 3.5.
  - Extremo mensual por MAD (Median Absolute Deviation): es una medida robusta de dispersión alrededor de la mediana, menos sensible a valores extremos que la desviación estándar. Se calcula por estación y mes, z_mad = |valor - mediana_mensual| / MAD_mensual y marca como extremo cuando z_mad > 6.

Así, IQR detecta valores fuera del rango intercuartílico esperado para cada mes, mientras que MAD funciona como una segunda prueba robusta basada en distancia respecto a la mediana mensual.

4.1.2 CLASIFICACIÓN FINAL DE CONSISTENCIA POR ESTACIÓN

La clasificación combina los resultados de las pruebas anteriores, la disponibilidad de datos (longitud y completitud) y la presencia de outliers relevantes. Los criterios se han definido con base en las recomendaciones de Campos-Aranda (2010) para homogeneidad regional (en particular las pruebas de discordancia y heterogeneidad) y en la práctica común de análisis de consistencia hidrometeorológica (Marulanda López, 2019; Guajardo-Panes et al., 2017). La siguiente tabla resume los criterios empleados:

Tabla 1. Criterios para calificación de nivel de consistencia de series hidroclimatológicas

Criterio	Alta	Moderada	Baja	Insuficiente
Longitud mínima	≥ 20 años	≥ 20 años	≥ 20 años	< 20 años
Completitud mínima	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%	< 80%
Independencia serial	Alta	Moderada	Baja	(cualquiera)
Cambio en media	Alta	Moderada	Baja	(cualquiera)
Cambio en varianza	Alta	Moderada	Baja	(cualquiera)
Tendencia	Alta	Moderada	Baja	(cualquiera)
Homogeneidad regional (SNHT)	Alta ($p > 0.05$)	Moderada ($0.01 < p \leq 0.05$)	Baja ($p \leq 0.01$) o sin vecinas	(cualquiera)
Outliers (IQR, MAD, climatol)	Ninguno o muy pocos y justificables	Algunos outliers leves	Múltiples outliers o extremos	(cualquiera)

Fuente: Elaboración propia

Regla de decisión final. Una estación se clasifica como Alta si cumple todos los criterios en el nivel más exigente (Alta en todas las pruebas). Se considera Moderada cuando cumple los requisitos básicos (≥20 años, ≥80% completitud) pero al menos una prueba cae en nivel Moderada (o alguna Baja con magnitud pequeña). La clasificación Baja se asigna si cumple los requisitos básicos pero presenta dos o más pruebas en nivel Baja, o una sola prueba Baja con magnitud grande (por ejemplo, pendiente relativa >10%, cambio de varianza con ratio >2 o <0.5, SNHT con p ≤ 0.01). Finalmente, una estación es Insuficiente si no alcanza los 20 años de registro o el 80% de completitud; esta clasificación prevalece sobre cualquier otro resultado.

4.1.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y HOMOGENEIDAD PARA PRECIPITACIÓN

En el anexo 1 se incluyen los resultados por estación y conjuntos (Ver *Tabla 2*), los cuales principalmente son los siguientes:

- 01_caract_est_P.csv: tabla principal de caracterización y clasificación final por estación.
- 02_correlacion_Pearson_P.csv y 02b_correlacion_Spearman_P.csv: matrices de correlación entre estaciones.
- 04_outliers_QC_P.csv: registros marcados como potenciales outliers por distintos métodos de control de calidad.
- 07_recomendacion_completado_P.csv: recomendación de estaciones/métodos para completado de datos.

Tabla 2. Productos del análisis de consistencia y homogeneidad.

Producto	Contenido	Uso
Figuras generales	Boxplot por estación, boxplot mensual, longitud de series y resumen de clasificación final	Explicar comportamiento general, periodos y balance de la red
Figuras individuales	Una ficha ESTACION_<codigo>_P.png por estación	Documentar serie mensual, media móvil, quiebres Pettitt/SNHT, histograma y climatología mensual
Shape/GeoPackage de estaciones	Puntos con coordenadas, clasificación final, completitud, años, SNHT, outliers, vecinas y métodos de completado	Revisión espacial de confiabilidad y selección de estaciones
Shape/GeoPackage de resultados principales	Subconjunto de características estaciones.	Control espacial de exclusiones

Producto	Contenido	Uso
Tabla de outliers definitivos	Registros IQR, MAD, Climatol	Depuración puntual de series

Fuente: Elaboración propia

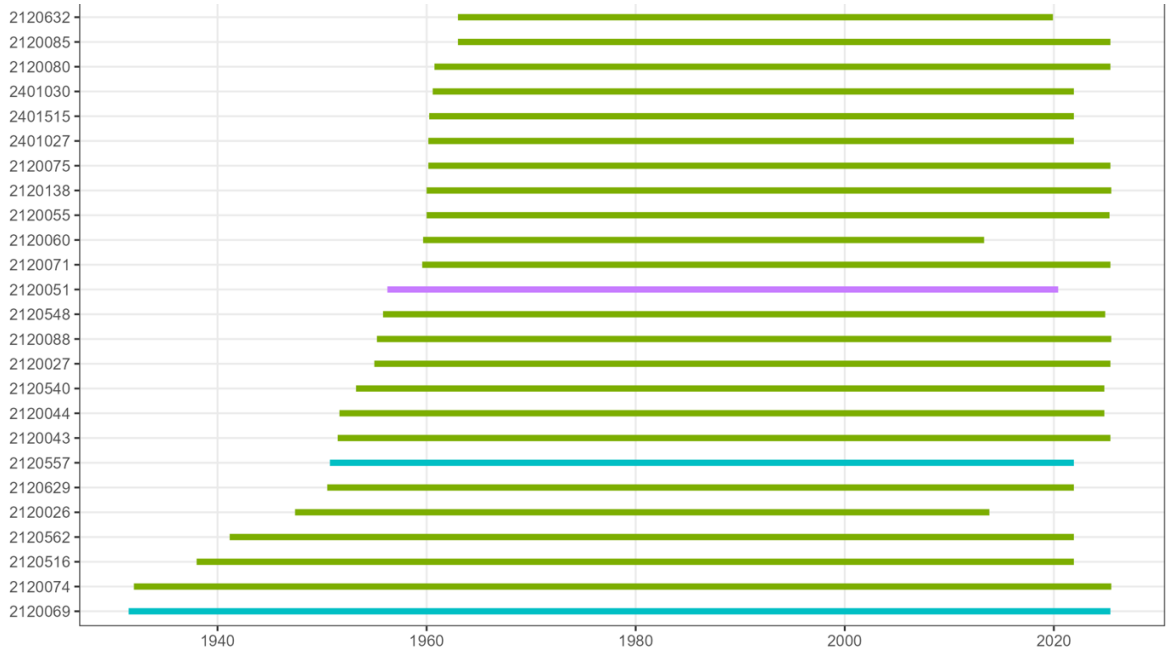
4.1.3.1 EXTENSIÓN DE LOS REGISTROS

A nivel general. estos resultados muestran que la red evaluada comprende 107 estaciones de precipitación mensual, con cobertura temporal amplia, desde 1931 hasta 2025. En términos generales, la red tiene una base temporal suficiente para análisis regionales, aunque no todas las series presentan la misma calidad de registro ni el mismo nivel de homogeneidad.

La longitud efectiva de las series es variable: el promedio de años equivalentes con dato es 43.0 años, con un rango entre 1.0 y 81.3 años. La completitud media de la red es 91.5%, lo cual indica una base de información relativamente robusta; sin embargo, existen estaciones que no cumplen los umbrales mínimos de evaluación.

La *Figura 1* de longitud de series (la cual dada su extensión solo se presenta parcialmente. En el anexo 1 se puede observar completa), muestra que la mayoría de las estaciones cuenta con registros prolongados y relativamente continuos, pero también evidencia algunos casos de series muy cortas o con vacíos importantes, los cuales terminan afectando la clasificación final.

Figura 1. Ejemplo longitud de series por estación



Fuente: Elaboración propia

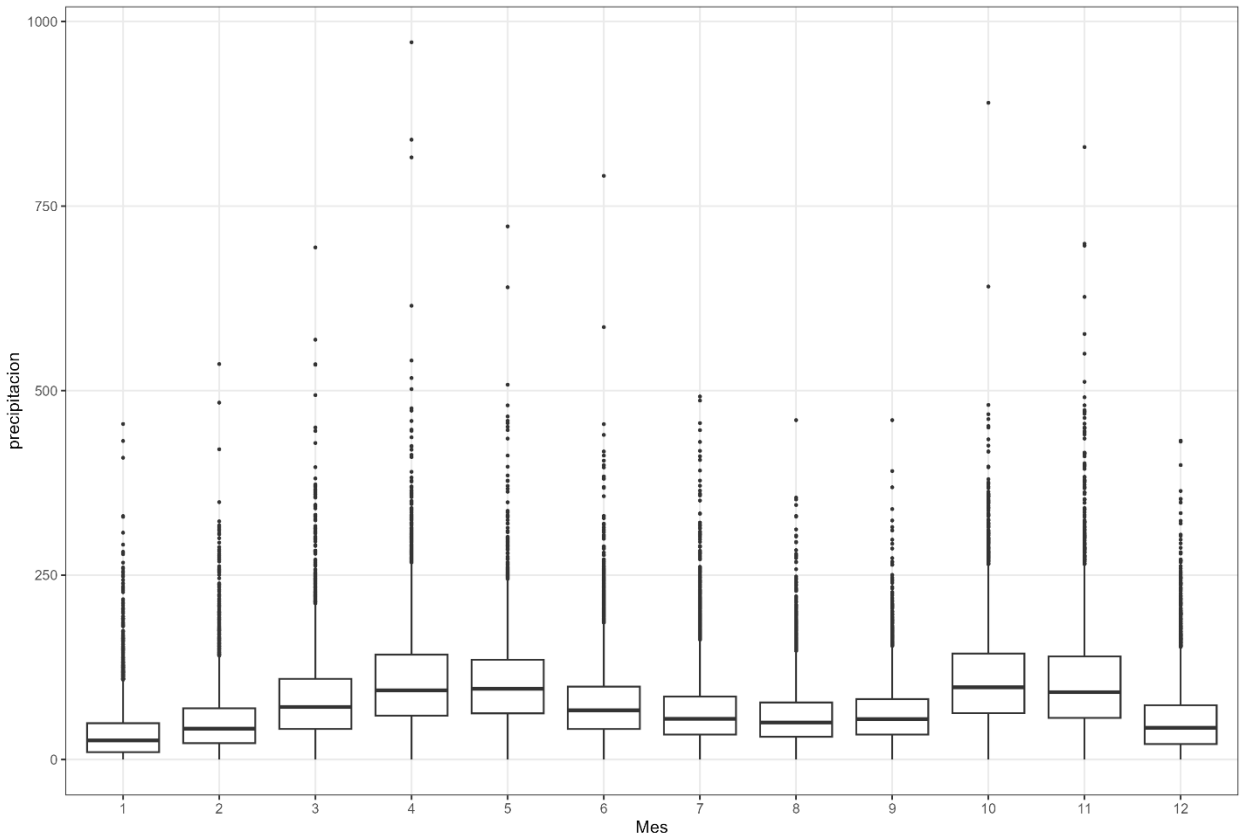
4.1.3.2 COMPORTAMIENTO GENERAL DE LA PRECIPITACIÓN Y ESTACIONALIDAD

Desde el punto de vista descriptivo, la precipitación mensual presenta la variabilidad esperada para este tipo de variable: distribución asimétrica positiva, alta dispersión y presencia de valores extremos altos en varios meses del año. El boxplot conjunto mensual (Ver Figura 2) evidencia una señal estacional clara, con valores medianos y dispersión mayores en los meses de abril–mayo y octubre–noviembre, mientras que los primeros meses del año presentan valores más bajos.

Esta estacionalidad multianual es coherente con el régimen bimodal típico de la precipitación en gran parte de la región andina colombiana y constituye una referencia útil para interpretar los cambios detectados en cada estación.

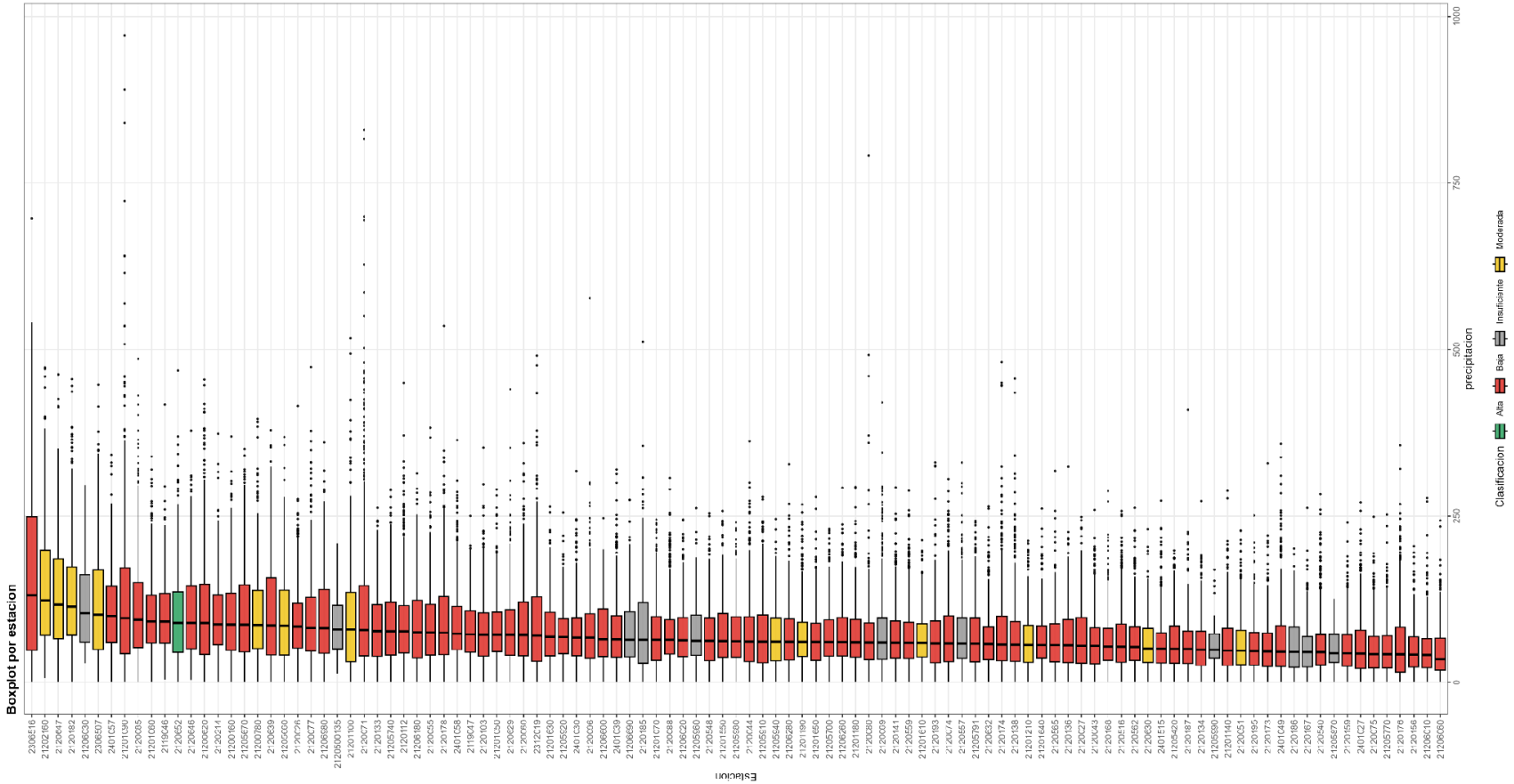
Por su parte, el boxplot por estación (Ver *Figura 3*) muestra que existen diferencias importantes en la magnitud y variabilidad de la precipitación entre estaciones, así como la presencia de observaciones extremas en varias de ellas. Estas diferencias no implican por sí mismas inconsistencia, pero sí muestran que el análisis debe hacerse de manera individual y regionalmente comparada, no solo con estadísticos globales.

Figura 2. Boxplot mensual del conjunto de estaciones.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Boxplot por estación, coloreado por clasificación final.



Fuente: Elaboración propia

4.1.3.3 CORRELACIÓN ENTRE ESTACIONES Y COHERENCIA ESPACIAL

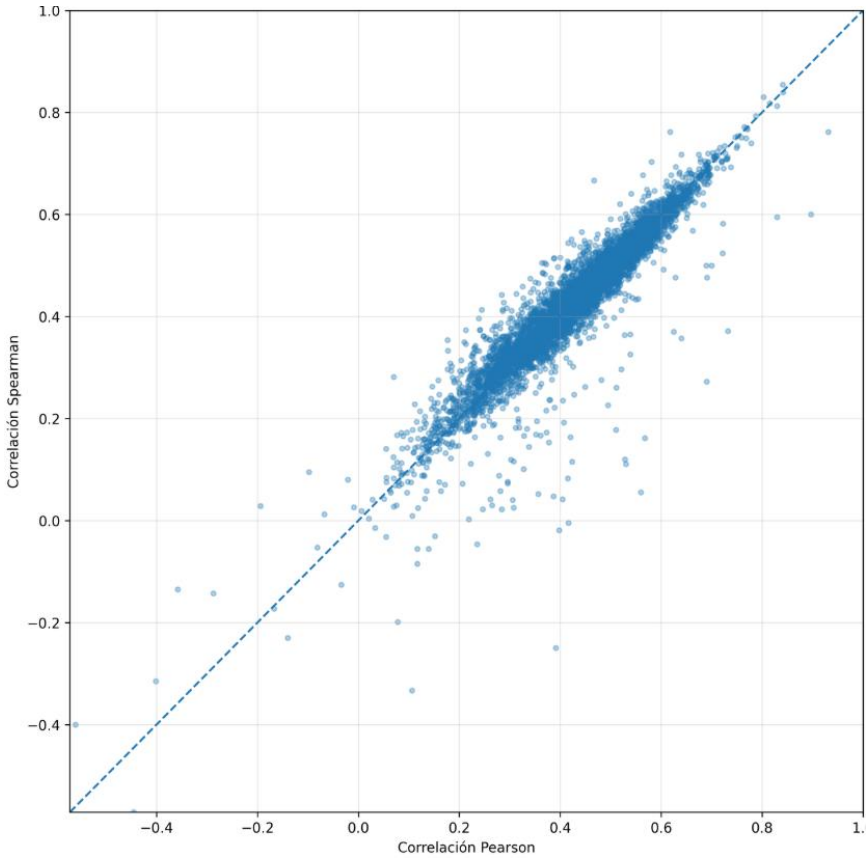
Las matrices de correlación de Pearson y Spearman muestran una coherencia espacial moderada entre estaciones. En términos generales, la correlación media fuera de la diagonal es cercana a 0.43 tanto para Pearson como para Spearman (Ver Figura 4), lo cual indica que existe relación regional entre series, aunque no lo suficientemente alta como para asumir uniformidad completa de la red.

Esto es importante por dos razones:

- Sustenta el uso de vecinas y referencias regionales para el análisis de homogeneidad y el completado de datos.
- Explica por qué la homogeneidad regional es exigente, ya que aun con correlaciones moderadas puede haber estaciones cuyo comportamiento relativo difiera de sus vecinas.

En otras palabras, la red sí tiene estructura regional aprovechable, pero no todas las estaciones responden de manera suficientemente coherente frente a su entorno.

Figura 4. Correlaciones Pearson y Spearman entre estaciones.



Fuente: Elaboración propia

4.1.3.4 CALIDAD DE DATOS Y OUTLIERS

El control de calidad de outliers identificó tres tipos de señal:

- 85 detecciones por IQR,
- 115 detecciones por MAD,
- 22 detecciones por Climatol.

para un total de 222 marcas en la tabla “04_outliers_QC_P” del anexo 1 (tablas), aunque varias corresponden a un mismo dato detectado por más de un método.

La interpretación del marco teórico es adecuada: los outliers no deben eliminarse automáticamente solo por aparecer como extremos estadísticos. En precipitación mensual es normal encontrar valores muy altos en meses lluviosos, por lo que los criterios IQR y MAD deben entenderse como una alerta inicial. El criterio de mayor peso para definir retiro es el control contextual o regional, es decir, los casos detectados por Climatol y no respaldados por estaciones vecinas.

En este análisis, los outliers con mayor sustento para retiro son precisamente los 22 registros con señal regional por Climatol, concentrados en 10 estaciones. Estos son los casos en los que el valor alto no encuentra soporte regional suficiente y, por tanto, debe considerarse como anomalía definitiva. Estos valores a retirar se presentan en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Registros a retirar por outlier regional.

Código	Estación	Fecha	Valor mensual
2120138	ENCANTO EL	1963-05	456
21201090	VIOTA [21201090]	1982-04	840
2120174	MANJUI	1982-11	450
2120174	MANJUI	1983-04	445.5
2120174	MANJUI	1983-05	446.5
21201090	VIOTA [21201090]	1986-04	972
21201090	VIOTA [21201090]	1986-10	890
2120187	BOMBAS SESQUILÉ	1990-01	409
2120138	ENCANTO EL	1993-05	435
2120173	CAMPOBELLO	1998-05	329
2120069	TESORO	1999-02	420.5
2120080	SAN JOSÉ	2002-05	370.9
2120080	SAN JOSÉ	2002-06	791

Código	Estación	Fecha	Valor mensual
2120080	SAN JOSÉ	2002-07	492
2120080	SAN JOSÉ	2002-08	460
2120193	GUANQUICA	2003-05	330.2
2120071	MARGARITAS LAS	2010-11	699
2120174	MANJUI	2021-10	480.6
2120071	MARGARITAS LAS	2024-10	830
2120096	CONSUELO EL	2024-10	576.7
2120071	MARGARITAS LAS	2025-03	694
2120071	MARGARITAS LAS	2025-04	816

Nota. La estación 2120069 Tesoro es Insuficiente, por lo que es retirada en su totalidad.
Elaboración propia

4.1.3.5 INDEPENDENCIA SERIAL

La independencia serial fue, en general, moderada en la mayoría de las estaciones. Los resultados (Ver Tabla 4) muestran:

- 96 estaciones con independencia Moderada,
- 4 estaciones con independencia Alta,
- 3 estaciones con independencia Baja,
- 4 estaciones no aplicables.

Este patrón es razonable en series mensuales de precipitación, donde suele existir persistencia temporal asociada a la dinámica climática regional. En consecuencia, la independencia serial no aparece como el principal factor limitante de la red. Solo en pocos casos su comportamiento resulta claramente desfavorable.

Tabla 4. Resumen de clases de independencia serial.

Clase de independencia serial	No. estaciones	Porcentaje	Interpretación
Alta	4	3.70%	No se evidencia dependencia serial significativa.
Moderada	96	89.70%	Existe alguna señal de dependencia, pero no crítica para el análisis mensual.

Clase de independencia serial	No. estaciones	Porcentaje	Interpretación
Baja	3	2.80%	Se evidencia dependencia serial importante; requiere revisión específica.
No aplicable	4	3.70%	No fue posible aplicar o interpretar adecuadamente la prueba.
Total	107	100.00%	—

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.6 CAMBIO EN LA MEDIA

La evaluación de cambio en la media (Ver Tabla 5) muestra que predominan señales moderadas, más que cambios abruptos fuertes. En particular:

- 79 estaciones fueron clasificadas como Moderada,
- 17 estaciones como Moderada-Baja,
- 6 estaciones como Alta,
- 1 estación como Baja,
- 4 estaciones no aplicables.

Esto indica que en una parte importante de la red existe evidencia de diferencia entre períodos, pero generalmente con magnitudes no tan grandes como para invalidar por sí sola la serie. En otras palabras, el cambio de media sí aporta a la calificación, pero normalmente en condición intermedia.

Tabla 5. Resumen de resultados de cambio en media.

Clase de cambio en media	No. estaciones	Porcentaje	Interpretación
Alta	6	5.60%	No se evidencia cambio significativo en la media.
Moderada	79	73.80%	Se identifica señal de cambio, pero de magnitud moderada.
Moderada-Baja	17	15.90%	Existe una señal más marcada de cambio en la media, aunque no necesariamente suficiente para descartar la estación por sí sola.
Baja	1	0.90%	Se evidencia cambio sustancial en la media; requiere revisión particular.

Clase de cambio en media	No. estaciones	Porcentaje	Interpretación
No aplicable	4	3.70%	No fue posible aplicar o interpretar adecuadamente la prueba.

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.7 CAMBIO EN LA VARIANZA

El análisis de varianza (Ver Tabla 6) presenta un resultado más favorable que el de cambio en media:

- 55 estaciones con clase Alta,
- 43 estaciones con clase Moderada,
- 5 estaciones con clase Baja,
- 4 estaciones no aplicables.

Esto sugiere que, para la mayoría de las series, la dispersión entre períodos permanece relativamente estable o presenta cambios de magnitud intermedia. Solo un grupo pequeño exhibe alteraciones marcadas en su variabilidad.

Tabla 6. Resumen de resultados de cambio en varianza.

Clase de cambio en varianza	No. estaciones	Porcentaje	Interpretación
Alta	55	51.40%	No se evidencia cambio significativo o relevante en la varianza.
Moderada	43	40.20%	Existe señal de cambio en la varianza, pero dentro de rangos aceptables.
Baja	5	4.70%	Se evidencia cambio fuerte en la varianza; requiere revisión específica.
No aplicable	4	3.70%	No fue posible aplicar o interpretar adecuadamente la prueba.
Total	**107**	**100.00%**	—

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.8 TENDENCIA

La prueba de tendencia (Ver Tabla 7) mostró un resultado claramente favorable:

- 103 estaciones con clase Alta,
- 4 estaciones no aplicables.

Esto significa que, bajo los criterios definidos, no se observan tendencias significativas o de magnitud preocupante en la mayoría de las series. En consecuencia, la tendencia no es un factor crítico en la clasificación final.

Tabla 7. Resumen de resultados de tendencia.

Clase de tendencia	No. estaciones	Porcentaje	Interpretación
Alta	103	96.30%	No se evidencia tendencia significativa o la magnitud relativa de la tendencia no es relevante.
Moderada	0	0.00%	No se identificaron estaciones con tendencia moderada.
Baja	0	0.00%	No se identificaron estaciones con tendencia fuerte.
No aplicable	4	3.70%	No fue posible aplicar o interpretar adecuadamente la prueba.
Total	**107**	**100.00%**	—

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.9 HOMOGENEIDAD REGIONAL (SNHT)

Este es el aspecto más importante del análisis y el principal responsable de la clasificación final obtenida. Los resultados de SNHT (Ver Tabla 8 y Figura 5) muestran:

- 71 estaciones con homogeneidad regional Baja,
- 6 estaciones con homogeneidad regional Moderada,
- 23 estaciones con homogeneidad regional Alta,
- 7 estaciones no aplicables.

La dominancia de la clase Baja indica que, aunque muchas estaciones tienen longitud suficiente, buena completitud y tendencia aceptable, su comportamiento relativo frente a las vecinas presenta señales de ruptura o inhomogeneidad. Esto puede estar asociado a factores como reubicación de estación, cambio de observador, cambio de instrumento, modificación del entorno local o problemas en la serie histórica.

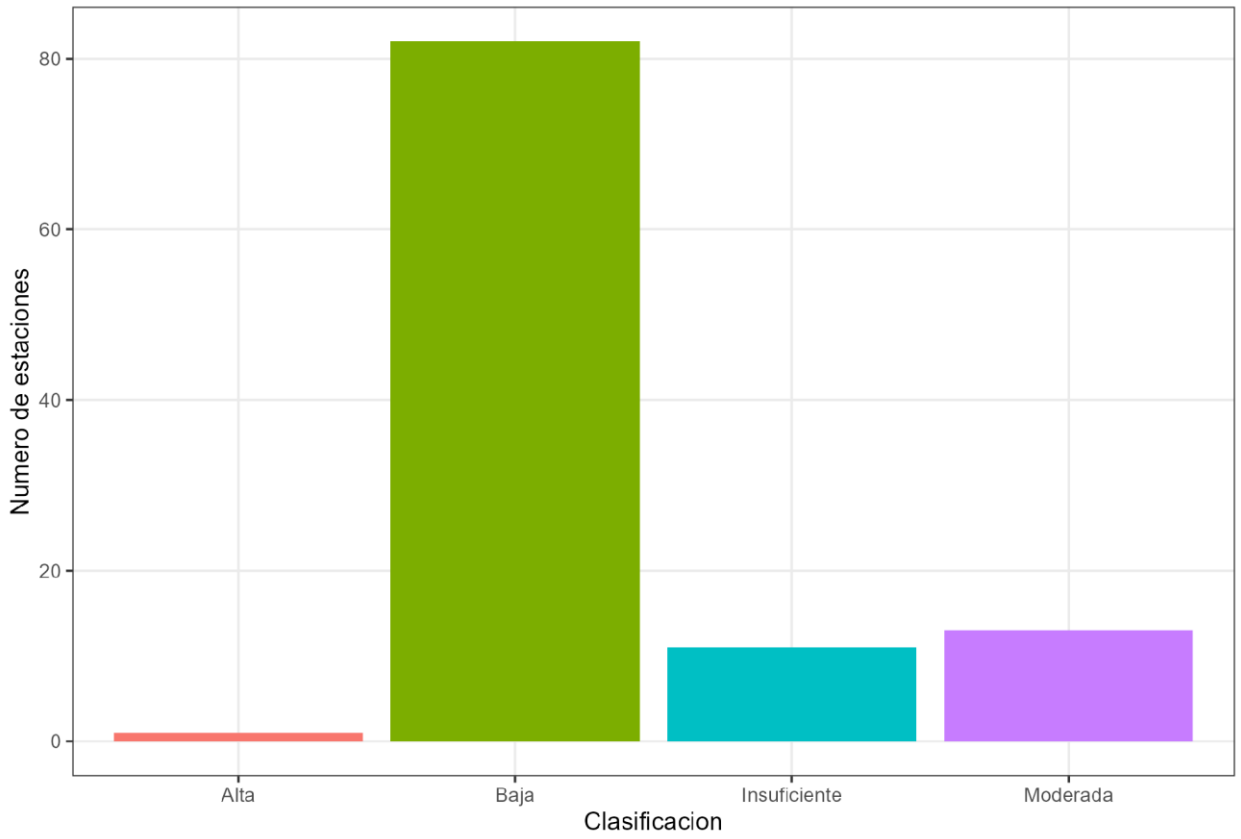
En términos prácticos, la homogeneidad regional es el criterio que más debilita la red y el que explica por qué la mayoría de las estaciones termina clasificada como Baja y no como Moderada o Alta.

Tabla 8. Resumen de clases SNHT.

Clase SNHT	No. estaciones	Porcentaje	Interpretación
Alta	23	21.50%	No se evidencia punto de cambio regional significativo.
Moderada	6	5.60%	Existe evidencia débil o moderada de inhomogeneidad regional.
Baja	71	66.40%	Existe evidencia clara de inhomogeneidad regional frente a las estaciones vecinas.
No aplicable	7	6.50%	No fue posible aplicar la prueba, principalmente por falta de vecinas o datos comunes suficientes.
Total	**107**	**100.00%**	—

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Resumen de clasificación final (muy útil porque refleja el efecto acumulado del SNHT sobre la clasificación global).



Fuente: Elaboración propia

4.1.3.10 INTERPRETACIÓN A NIVEL INDIVIDUAL

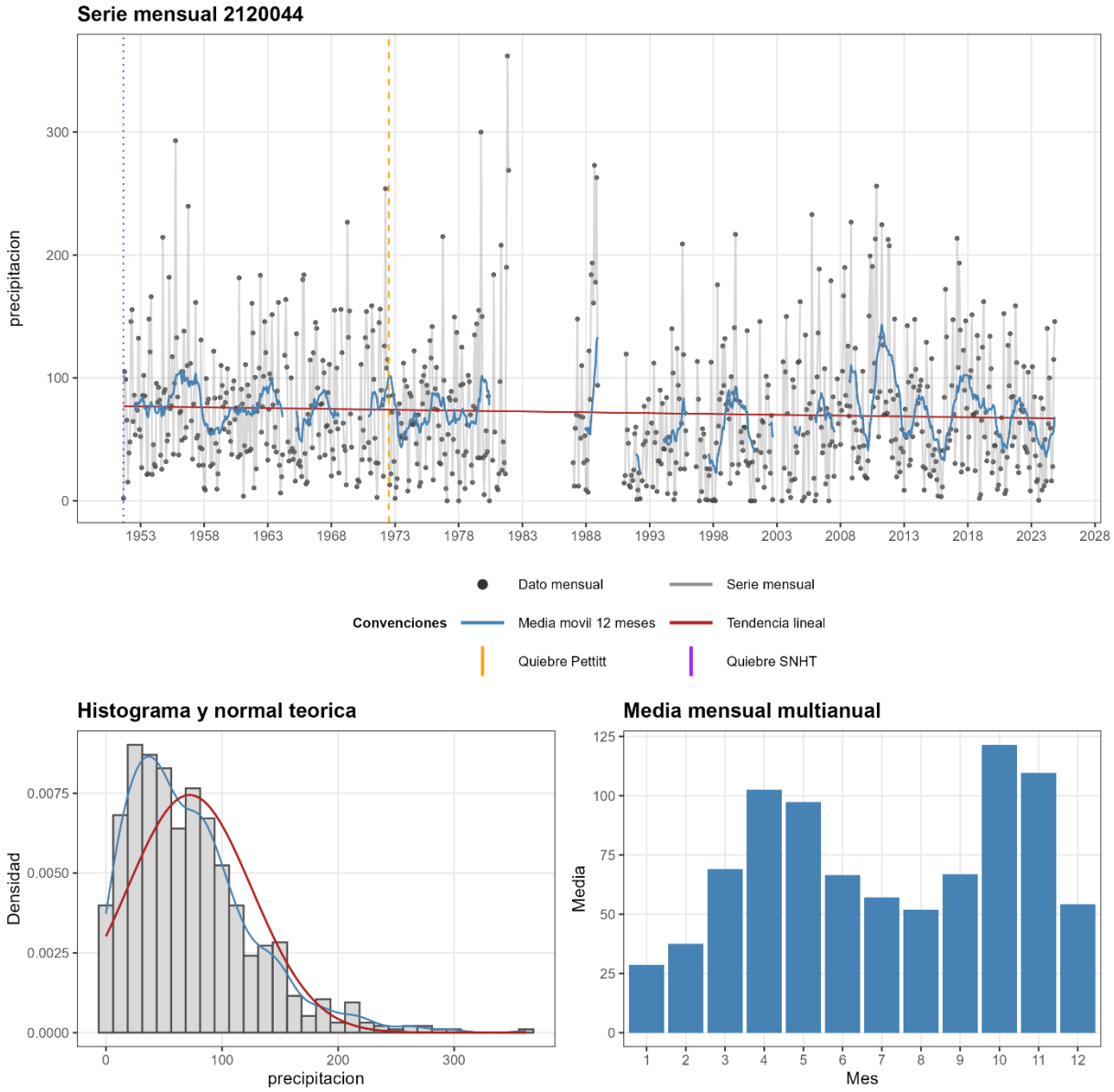
La figura individual por estación es muy útil para documentar de forma sintética el comportamiento de cada serie. Como ejemplo, pues son demasiadas, se coloca la Figura 6 correspondiente a la estación 2120044 – PRADERA LA. En el anexo 1, carpetas Figuras/Estaciones se incluye la totalidad de las figuras para todas las estaciones.

Esta estación ilustra bien el patrón dominante en la red:

- tiene una serie larga (1951–2024),
- 63.7 años equivalentes de dato,
- completitud de 86.9%,
- pocos outliers internos,
- cambio en media y varianza de orden moderado,
- tendencia sin importancia práctica,
- pero SNHT Bajo, con un quiebre regional temprano.

Por ello, a pesar de ser una estación extensa y con completitud aceptable, su clasificación final es Baja. Este ejemplo confirma que la decisión final no depende únicamente de la longitud o la completitud, sino del comportamiento conjunto frente a todos los criterios del marco teórico, especialmente la homogeneidad regional.

Figura 6. Ejemplo de diagnóstico individual por estación (caso ESTACION_2120044).



Fuente: Elaboración propia

4.1.3.11 CLASIFICACIÓN FINAL Y BALANCE GENERAL

La clasificación final obtenida para las 107 estaciones es:

- Alta: 1 estación
- Moderada: 13 estaciones
- Baja: 82 estaciones
- Insuficiente: 11 estaciones

El balance global del análisis puede resumirse así:

La red tiene buena cobertura temporal y completitud en términos generales. El problema principal no es la escasez de información, sino la calidad relativa de una parte importante de las series.

La mayoría de las estaciones no presenta tendencia fuerte ni cambios graves de varianza.

Tampoco la independencia serial aparece como una limitación crítica.

El principal factor de deterioro es la homogeneidad regional (SNHT).

Esto lleva a que muchas estaciones queden clasificadas como Baja aunque cumplan requisitos básicos de longitud y completitud.

Las estaciones clasificadas como Insuficiente deben retirarse del análisis principal.

En total son 11 estaciones (Ver *Tabla 8*), de las cuales:

- fallan principalmente por completitud,
- 2 fallan principalmente por longitud,
- 3 fallan por ambos criterios.

Los datos a retirar por outliers definitivos, como se dijo anteriormente, corresponden a los registros con señal regional concluyente, es decir, los 22 registros detectados por Climatol sin respaldo regional suficiente (Ver *Tabla 3*).

Después de retirar las estaciones Insuficientes, quedan 96 estaciones utilizables, pero con distintos niveles de confianza:

- 14 estaciones (Alta + Moderada) pueden considerarse el subconjunto de referencia más confiable.
- 82 estaciones Baja pueden conservarse para análisis complementarios, interpolación condicionada o procesos posteriores de homogenización, pero no deben tratarse como series de alta confiabilidad.

Tabla 9. Estaciones retiradas por clasificación Insuficiente

Código	Estación	Inicio	Fin	Años equiv.	Completitud	Causa de retiro
2120069	TESORO	1931-07	2025-06	74.9	79.70%	Completitud < 80%
2120167	HOYO ARRIBA EL	1986-01	2025-07	30.6	77.30%	Completitud < 80%
2120185	TRIBUNA LA	1993-04	2025-07	21.8	67.30%	Completitud < 80%
2120186	MARÍA LA	1993-05	2025-07	23.2	71.80%	Completitud < 80%

Código	Estación	Inicio	Fin	Años equiv.	Completitud	Causa de retiro
2120557	PRIMAVERA LA	1950-10	2021-12	55.7	78.10%	Completitud < 80%
21205870	EL SALITRE [21205870]	2018-09	2024-03	3.8	68.70%	Longitud < 20 años y completitud < 80%
21205960	TACHI [21205960]	1987-12	2025-12	28.3	74.40%	Completitud < 80%
21205990	EL LLANO [21205990]	2013-05	2024-03	2.8	25.20%	Longitud < 20 años y completitud < 80%
21206030	SAN CAYETANO [21206030]	1978-01	1978-12	1	100.00%	Longitud < 20 años
21206690	COLEGIO MIGUEL A. CARO [21206690]	2002-08	2023-11	15.6	73.00%	Longitud < 20 años y completitud < 80%
2120500135	UNIVERSIDAD DE LA SABANA [2120500135]	2020-10	2022-05	1.7	100.00%	Longitud < 20 años

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.12 MODIFICACIONES REALIZADAS A LOS DATOS EXISTENTES PARA MEJORAR CONSISTENCIA DE LAS SERIES

Cambios realizados

Con las estaciones y datos no retirados, se realiza un ajuste por consistencia con ayuda del software Climatol que construye una referencia regional a partir de estaciones cercanas o correlacionadas a la estación bajo análisis. Luego compara la serie analizada contra esa referencia, previa normalización o estandarización de los datos, con el fin de hacer comparables estaciones que pueden tener diferentes magnitudes de precipitación, altitud o régimen climático.

A partir de esta comparación, la herramienta detecta valores puntuales que se apartan de lo esperado regionalmente, los cuales pueden corresponder a errores de digitación, lectura, acumulaciones mal reportadas o registros físicamente poco coherentes. También permite identificar rupturas o no homogeneidades en la serie, como cambios de media asociados a modificaciones en el instrumento, ubicación, entorno de medición, método de observación o errores sistemáticos.

Cuando se detecta una ruptura significativa, climatol puede dividir o tratar la serie por segmentos, ajustando los tramos para hacerlos compatibles con el comportamiento regional. De esta manera, los valores inconsistentes pueden ser corregidos o reemplazados, y los datos faltantes pueden ser estimados cuando esa opción se habilita.

Los resultados de este proceso se incluyen en el anexo 1 directorio Tablas, donde está el cuadro “05_series_P_consistentes” con las series corregidas por inconsistencia en algunos de sus datos, el cuadro “06_caract_est_P_consistentes” con los nuevos estadísticos y características de las series corregidas y el cuadro “07_flags_P_consistentes” con la identificación de los valores corregidos para cada una de las estaciones.

La nueva versión del análisis de consistencia conserva entonces 96 estaciones y excluye las 11 estaciones clasificadas como insuficientes. En términos generales, representa una mejora frente a la versión original, ya que aumenta el número de estaciones con clasificación final Alta o Moderada de 14 a 23, mientras que las estaciones con clasificación Baja disminuyen de 82 a 73. Esta mejora también se refleja en la prueba SNHT, uno de los aspectos críticos del análisis, donde las estaciones con clasificación Alta o Moderada aumentan de 28 a 42, y las clasificadas como Baja disminuyen de 67 a 53.

En total, se corrigieron 22.372 datos en 64 estaciones, mientras que 32 estaciones no presentaron modificaciones. Las estaciones con mayor número de datos corregidos fueron ENCANTO_EL, MARGARITAS_LAS, IBERIA_LA, SAN_JOSÉ, ZIPAQUIRÁ, PRADERA_LA, VILLAPINZÓN, FORTUNA_LA, BOSQUE_EL y PINO_EL, todas con más de 550 registros corregidos.

Las mejoras estadísticas más relevantes se observan en la reducción de outliers y en las pruebas de homogeneidad. Los outliers internos disminuyen de 101 a 69, los climatológicos de 21 a 4 y los regionales bajan levemente de 729 a 721. También mejora la clasificación por cambio en varianza, con estaciones en categoría Alta que pasan de 52 a 64, y disminuyen los casos de cambio en media Moderada-Baja de 16 a 3. La independencia serial también mejora, al pasar de 2 estaciones en categoría Baja a ninguna. La tendencia se mantiene favorable, con las 96 estaciones clasificadas como Alta.

En cuanto a las pruebas con p-valor aceptable, se observan mejoras en Ljung-Box, Pettitt, Mann-Whitney, Levene, Mann-Kendall y SNHT. La única señal ligeramente menos favorable corresponde a la prueba de rachas, que baja de 21 a 20 estaciones con p-valor aceptable. Para SNHT, específicamente, el p-valor mejora en 44 estaciones, empeora en 30 y permanece igual en 21, por lo que no se trata de una mejora universal, pero sí de una mejora neta de la red.

La clasificación final también muestra un efecto positivo: 11 estaciones mejoran de categoría y solo 2 empeoran. Entre las estaciones que pasan de Baja a Moderada se encuentran BATÁN, TORCA, VIOTA, ACANDY, RAMADA_LA, SUASUQUE, ACAPULCO, FORTUNA_LA, HATILLO_EL y HATO_No_6_EL, mientras que LA_FLORIDA mejora de Baja a Alta. Por el contrario, APOSTOLICA y VILLA_INES desmejoran de Moderada a Baja.

Efecto del ajuste de consistencia en las características de las series

Al revisar las 96 estaciones conservadas, se observa que el porcentaje de datos corregidos por homogenización, equivalente al 42,9 %, el cual puede parecer alto en una primera lectura, pero no significa necesariamente que la estructura estadística de todas las series haya cambiado en esa misma magnitud. De hecho, los estadísticos más representativos del régimen mensual general, como la media y la desviación estándar, se mantienen

relativamente estables en la mayoría de las estaciones. Los cambios fuertes se concentran en un grupo reducido, mientras que los estadísticos asociados a la forma de la distribución, especialmente el sesgo y la curtosis, resultan mucho más sensibles a la corrección de valores extremos.

En términos generales, la media presenta un cambio absoluto mediano de 3,51 % y la desviación estándar de 2,85 %, con 73 y 76 estaciones, respectivamente, que registran variaciones menores o iguales al 10 %. Esto indica que, para la mayor parte de la red, el proceso de corrección no alteró de manera severa ni el régimen mensual promedio ni la dispersión general de las series. En contraste, la curtosis muestra una variación mucho mayor, con un cambio medio de 27,63 % y 35 estaciones con cambios superiores al 20 %. Este comportamiento es esperable, ya que la curtosis responde fuertemente a la presencia o corrección de los valores extremos.

Las estaciones que requieren mayor atención son aquellas donde la corrección sí produjo cambios importantes en el nivel medio o en la variabilidad mensual. En la media se destacan STA ISABEL y LAS MARGARITAS en la desviación estándar VIOTA y EL DORADO CATAM y en ambos estadístico LA ESPERANZA, LA IBERIA y EL HATO No 7. En estos casos, la modificación no puede considerarse solamente marginal, por lo que conviene revisar individualmente las series antes de aceptar la versión consistente como producto final.

Adicionalmente, para estas siete estaciones, que fueron las que presentaron los cambios más importantes en sus estadísticos, se evaluó la correlación de las series originales y consistentes con el producto satelital CHIRPS (Ver Tabla 10), como referencia externa de contraste. Este procedimiento, que se describe con mayor detalle en la sección de llenado de datos, muestra una mejora clara en los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman después del proceso de consistencia. En consecuencia, aunque las modificaciones realizadas en estas estaciones fueron relevantes, la comparación con CHIRPS indica que dichas correcciones no deterioraron las series, sino que mejoraron su coherencia frente a una fuente regional independiente.

Tabla 10. Coeficientes de correlación de datos CHIRPS con series originales y después de modificaciones por proceso de consistencia

Estación	Coeficiente de correlación de Pearson		Coeficiente de correlación de Spearman	
	Serie consistente	Serie original	Serie consistente	Serie original
STA ISABEL	0.579	0.061	0.581	0.047
MARGARITAS LAS	0.617	-0.221	0.691	-0.178
VIOTA	0.726	0.415	0.782	0.299
EL DORADO CATAM	0.819	-0.096	0.781	-0.070
ESPERANZA LA	0.738	0.008	0.718	0.032

Estación	Coeficiente de correlación de Pearson		Coeficiente de correlación de Spearman	
	Serie consistente	Serie original	Serie consistente	Serie original
IBERIA LA	0.806	-0.159	0.824	-0.141
HATO No 7 EL	0.726	-0.159	0.681	-0.175

Fuente: Elaboración propia

Existen estaciones con una alta proporción de datos corregidos, incluso superior al 40 %, pero con cambios menores o iguales al 5 % en media y desviación estándar. Esto sugiere que muchas correcciones corresponden a ajustes proporcionales o regionales relativamente suaves, y no necesariamente a reemplazos drásticos que modifiquen sustancialmente el comportamiento mensual de las series.

A partir de los cuadros de características se puede evaluar la relación entre los estadísticos originales y consistentes a nivel de red. Esta comparación muestra correlaciones altas para la media y la desviación estándar, de 0,941 y 0,952, respectivamente, lo que confirma que el proceso conserva bien la jerarquía espacial de los valores medios y de la dispersión. En cambio, las correlaciones del sesgo y la curtosis son bajas, de 0,374 y 0,116, lo cual indica que la forma de la distribución sí fue modificada de manera importante, especialmente en relación con los valores extremos.

En conclusión, aunque el 42,9 % de datos corregidos es un porcentaje alto y debe justificarse adecuadamente, no implica que todas las series hayan cambiado de forma intensa. La mayoría de las estaciones conserva cambios menores al 10 % en media y desviación estándar, por lo que el régimen mensual general se mantiene razonablemente estable. No obstante, se identificó un grupo específico de estaciones: STA ISABEL (2120176), LA ESPERANZA (2120647), IBERIA LA (2120548), MARGARITAS LAS (2120071), HATO No. 7 EL (2401058), VIOTA (21201090) y EL DORADO CATAM (21205791); en las que el proceso de consistencia produjo modificaciones relevantes en sus estadísticos. En estos casos, la magnitud de los cambios requería una verificación adicional; por ello, se contrastaron las series corregidas con CHIRPS. Los resultados muestran que, después del ajuste, estas estaciones presentan una correlación considerablemente mayor con la información satelital, lo que respalda la validez de las modificaciones realizadas y confirma que el proceso mejoró la coherencia regional de las series.

4.1.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y HOMOGENEIDAD PARA OTRAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS

En esta sección se presentan los resultados del análisis de consistencia y homogeneidad aplicado a las variables mensuales de temperatura máxima (TMAX), temperatura media (TMED), temperatura mínima (TMIN), brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento y caudal medio. Los resultados se obtienen a partir de la información del anexo 2, donde se presentan en detalle las tablas y figuras con los resultados del análisis.

4.1.4.1 EXTENSIÓN DE LOS REGISTROS

La red evaluada presenta diferente extensión de registros de acuerdo con la variable analizada. Las temperaturas cuentan con una cantidad importante de estaciones, especialmente temperatura mínima, con 53 estaciones, seguida de temperatura media con 46 y temperatura máxima con 40. El caudal medio presenta la red más amplia, con 139 estaciones, aunque también es la variable con mayor número de estaciones insuficientes.

La completitud media es, en general, aceptable, con valores entre 71,1 % para velocidad del viento y 86,8 % para caudal medio. No obstante, la cantidad de estaciones insuficientes es importante en varias variables, principalmente en caudal medio, velocidad del viento y temperatura media.

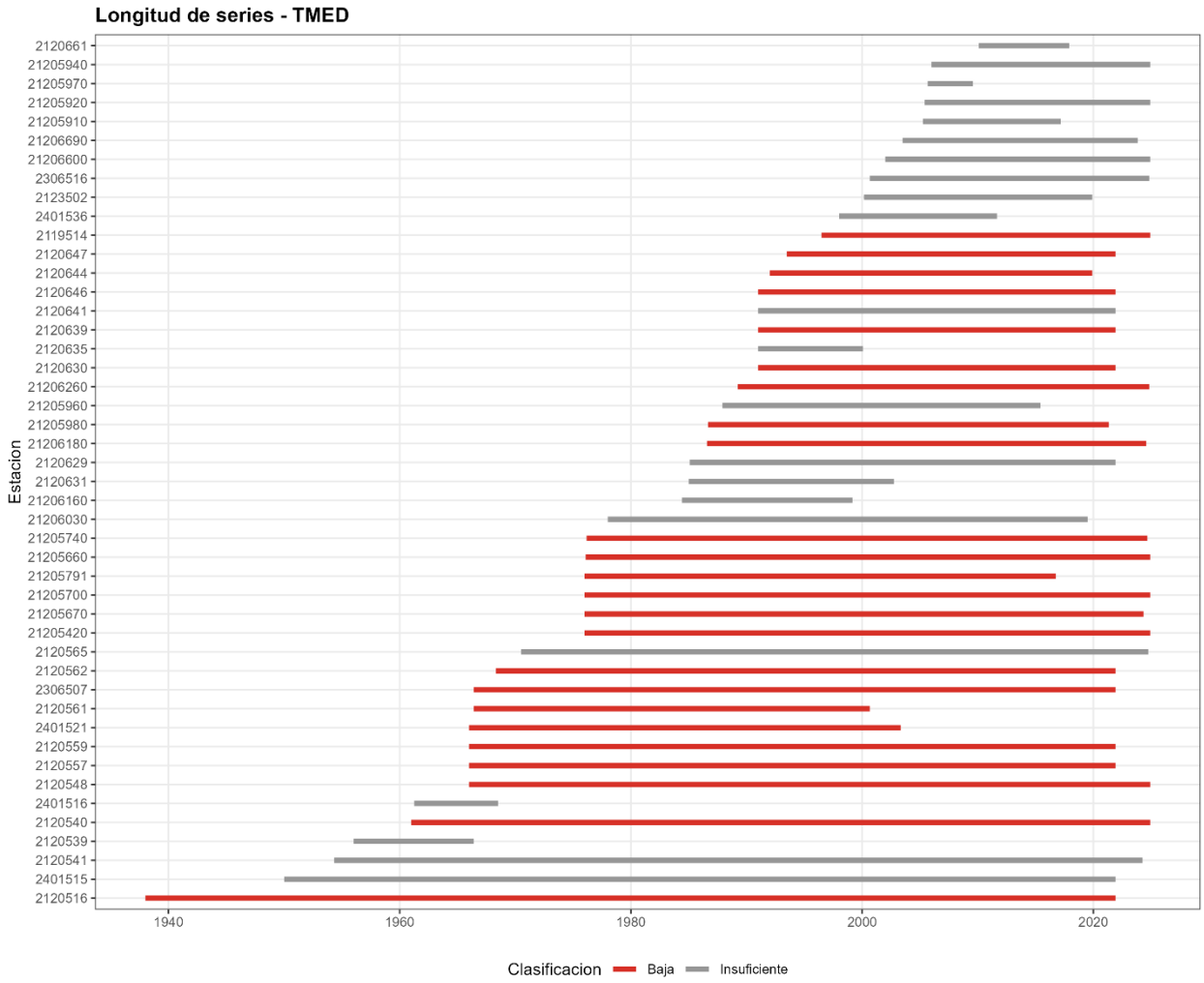
Tabla 11. Resumen general de estaciones y completitud por variable.

Variable	Estaciones	Suficientes	Insuficientes	Completitud media
TMAX	40	24	16	78,3 %
TMED	46	24	22	78,9 %
TMIN	53	38	15	83,9 %
Brillo solar	25	13	12	80,4 %
Humedad relativa	19	11	8	78,9 %
Velocidad del viento	22	4	18	71,1 %
Caudal medio	139	63	76	86,8 %

Fuente: Elaboración propia

Para toda esta sección, se presentan como ejemplo de los análisis realizados los resultados para la variable de temperatura media. En el anexo 2 se encuentra la misma información para las variables restantes.

Figura 7. Longitud de series mensuales de temperatura media.



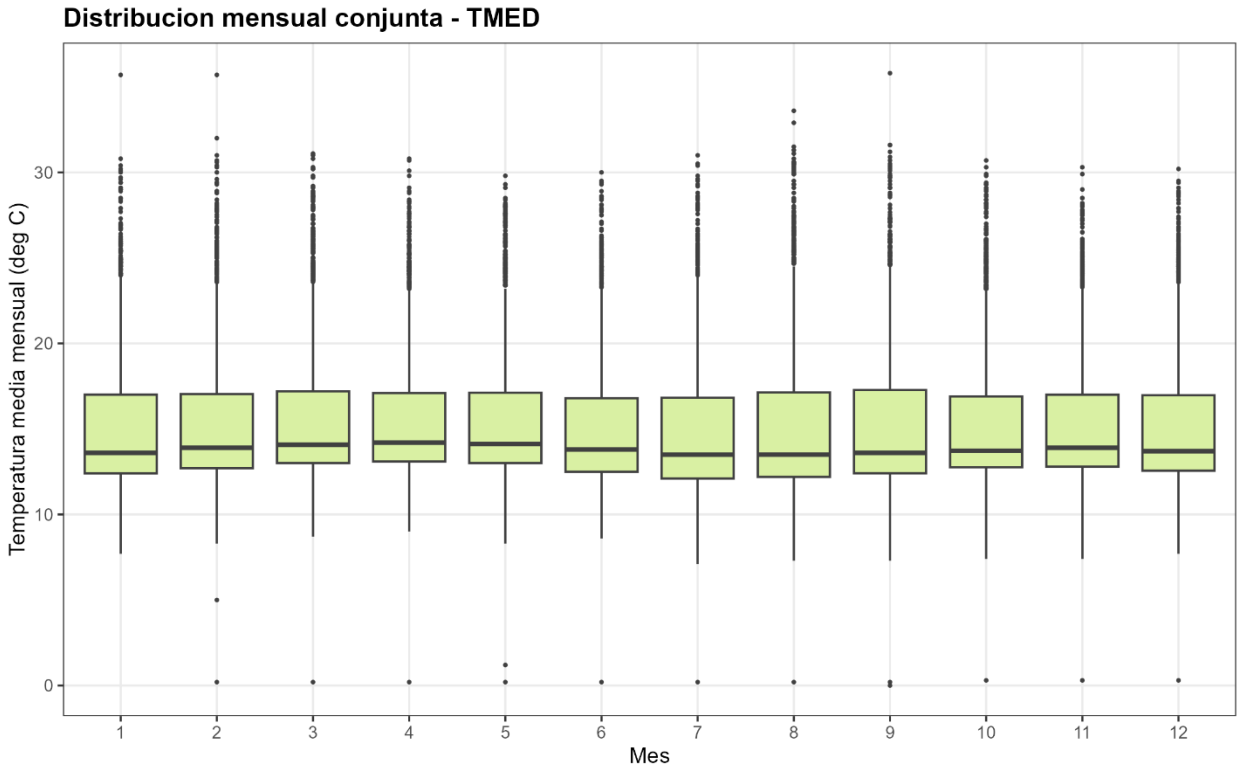
Fuente: Elaboración propia

4.1.4.2 COMPORTAMIENTO GENERAL DE LAS VARIABLES Y ESTACIONALIDAD

Las variables analizadas presentan comportamientos estadísticos diferenciados. Las temperaturas muestran menor dispersión relativa que la precipitación y una estructura estacional más regular. El brillo solar, la humedad relativa y la velocidad del viento reflejan patrones mensuales condicionados por la dinámica climática regional. El caudal medio presenta mayor asimetría, dispersión y sensibilidad a valores extremos, como es esperable en series hidrológicas mensuales.

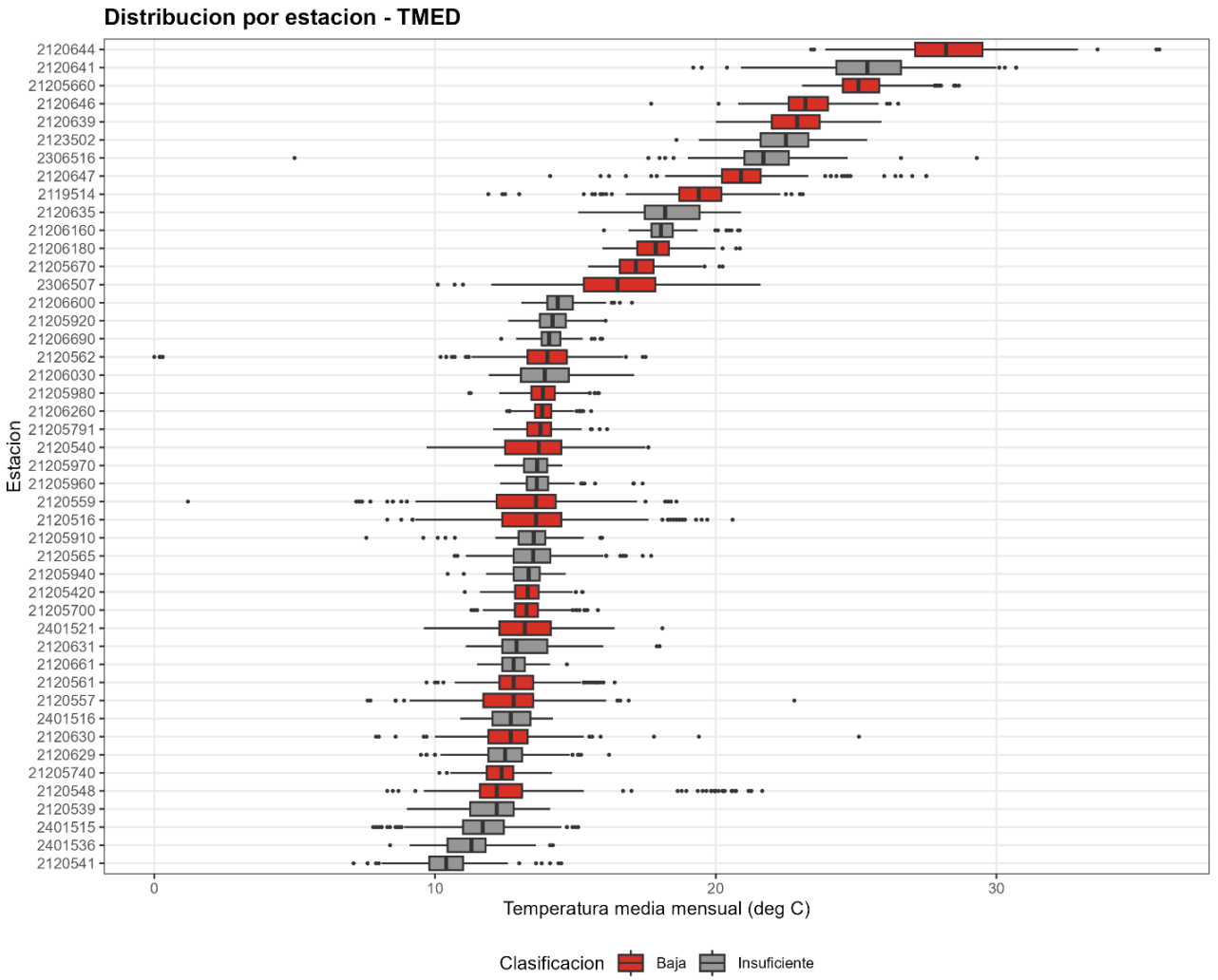
En términos generales, los boxplots mensuales (Ver Figura 8) permiten identificar la estacionalidad propia de cada variable, mientras que los boxplots por estación (Ver *Figura 9*) muestran diferencias espaciales relevantes. Estas diferencias no deben interpretarse automáticamente como inconsistencias, pero sí justifican el análisis individual y regional de cada estación.

Figura 8. Boxplot mensual temperatura media.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Boxplot por estación para la temperatura media



Fuente: Elaboración propia

4.1.4.3 CORRELACIÓN ENTRE ESTACIONES Y COHERENCIA ESPACIAL

La red de las estaciones vecinas[1] muestra que existe estructura regional aprovechable, aunque con diferencias importantes entre variables. Las redes más favorables, en términos de número de estaciones con referencia regional, corresponden a caudal medio, humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar. En cambio, la temperatura media presenta una mayor cantidad de estaciones sin vecinas regionales suficientes.

Tabla 12. Resumen de disponibilidad de vecinas regionales.

Variable	Estaciones	Sin referencia	1–2 vecinas	≥3 vecinas	≥5 vecinas
TMAX	40	12	12	16	7
TMED	46	22	12	12	10
TMIN	53	19	9	25	22
Brillo solar	25	4	7	14	9
Humedad relativa	19	2	6	11	8
Velocidad del viento	22	5	4	13	11
Caudal medio	139	24	26	89	76

Fuente: Elaboración propia

Se identifican grupos regionales útiles (Ver Tabla 12), especialmente en temperatura mínima, velocidad del viento y caudal medio. No obstante, para caudal medio la selección de vecinas no debe basarse únicamente en distancia y correlación, sino también deben considerarse criterios de coherencia hidrológica: área aferente, ubicación en la red de drenaje y régimen de la cuenca.

[1] En este análisis, el concepto de vecindad no se definió únicamente por cercanía geográfica, sino por una combinación de simultaneidad temporal, coherencia estadística y distancia espacial. Operativamente, una estación fue aceptada como vecina cuando presentó al menos 60 meses comunes con la estación candidata y una correlación mínima de 0,50. Este umbral corresponde a una correlación moderada, suficiente para construir una referencia regional sin exigir que las estaciones tengan comportamientos idénticos. Posteriormente, se seleccionaron hasta 5 estaciones vecinas por estación candidata, priorizando aquellas con mayor correlación y menor distancia. Las distancias se calcularon con coordenadas proyectadas en EPSG:9377 (ctm12), por lo que corresponden a distancias euclidianas en kilómetros. No se aplicó un umbral explícito de diferencia altitudinal máxima en los parámetros suministrados; por tanto, la altitud no debe presentarse como criterio rígido de exclusión, sino como una variable auxiliar de interpretación.

4.1.4.4 CALIDAD DE DATOS Y OUTLIERS

El control de calidad identificó outliers internos, físicos y regionales. Como se observa en la Tabla 13, los outliers físicos fueron prácticamente inexistentes, salvo un caso en velocidad del viento. Esto indica que la mayoría de los valores se encuentra dentro de los rangos físicos definidos para cada variable.

El mayor número de marcas se presenta en caudal medio, con 1.417 outliers internos y 79 regionales, comportamiento esperable por la alta variabilidad natural de los caudales mensuales. En las temperaturas, los outliers internos son moderados, pero deben revisarse junto con la validación cruzada entre temperatura máxima, media y mínima.

Tabla 13. Resumen de outliers por variable.

Variable	Outliers internos	Outliers físicos	Outliers regionales
TMAX	193	0	27
TMED	173	0	10
TMIN	296	0	25
Brillo solar	40	0	16
Humedad relativa	49	0	5
Velocidad del viento	108	1	2
Caudal medio	1.417	0	79

Fuente: Elaboración propia

El único outlier físico identificado corresponde a la estación 2120561 – MUÑA EL, en velocidad del viento, con un valor fuera del rango físico configurado. Este dato debe revisarse contra el registro original antes de decidir su corrección o retiro.

Al observar las series históricas de las estaciones, se aprecia que todos los valores identificados como outlier visualmente se originan en lapsos de tiempo muy diferenciados del resto de la serie, por lo que si se asumen como valores anómalos.

4.1.4.5 INDEPENDENCIA SERIAL

La independencia serial no aparece como el principal factor limitante de la red, aunque algunas variables presentan persistencia temporal asociada al comportamiento climático o hidrológico mensual. Esta situación es esperable, especialmente en temperatura, humedad relativa y caudal medio, donde los valores mensuales suelen estar condicionados por la persistencia de condiciones atmosféricas o hidrológicas.

En consecuencia, la independencia serial debe ser considerada como una alerta complementaria, pero no como el criterio dominante para excluir estaciones. La revisión se

concentra en los casos donde la dependencia se combine con baja completitud, cambios de media, cambios de varianza o SNHT significativo

4.1.4.6 CAMBIO EN LA MEDIA

El cambio en la media es uno de los factores más frecuentes en las variables analizadas. Se identifican señales de cambio en 31 estaciones de TMAX, 35 de TMED, 46 de TMIN, 17 de brillo solar, 19 de humedad relativa, 19 de velocidad del viento y 103 de caudal medio (Ver Tabla 14).

Tabla 14. Resumen de resultados de cambio en media.

Variable	Estaciones con cambio de media
TMAX	31
TMED	35
TMIN	46
Brillo solar	17
Humedad relativa	19
Velocidad del viento	19
Caudal medio	103

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.7 CAMBIO EN LA VARIANZA

El cambio en la varianza también es relevante, especialmente en caudal medio, donde 97 estaciones presentan señal de cambio. En las variables climáticas, las señales son menores, pero no despreciables: 23 estaciones en TMAX, 22 en TMED, 27 en TMIN, 9 en brillo solar, 9 en humedad relativa y 12 en velocidad del viento (Ver Tabla 15).

Tabla 15. Resumen de resultados de cambio en varianza.

Variable	Estaciones con cambio de varianza
TMAX	23
TMED	22
TMIN	27

Variable	Estaciones con cambio de varianza
Brillo solar	9
Humedad relativa	9
Velocidad del viento	12
Caudal medio	97

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.8 TENDENCIA

A diferencia de la precipitación, donde la tendencia no fue un factor crítico, en las otras variables se observa una alta frecuencia de tendencias significativas. Esto es particularmente evidente en temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y caudal medio (Ver Tabla 16).

Tabla 16. Resumen de resultados de tendencia.

Variable	Estaciones con tendencia significativa
TMAX	24
TMED	28
TMIN	41
Brillo solar	13
Humedad relativa	18
Velocidad del viento	18
Caudal medio	76

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.9 HOMOGENEIDAD REGIONAL (SNHT)

La prueba SNHT representa uno de los criterios más restrictivos del análisis. Se identifican señales significativas en 23 estaciones de TMAX, 20 de TMED, 30 de TMIN, 16 de brillo solar, 16 de humedad relativa, 13 de velocidad del viento y 95 de caudal medio (Ver Tabla 17).

Tabla 17. Estaciones con SNHT significativo por variable.

Variable	Estaciones con SHNT significativo
TMAX	23
TMED	20
TMIN	30
Brillo solar	16
Humedad relativa	16
Velocidad del viento	13
Caudal medio	95

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.10 INTERPRETACIÓN A NIVEL INDIVIDUAL

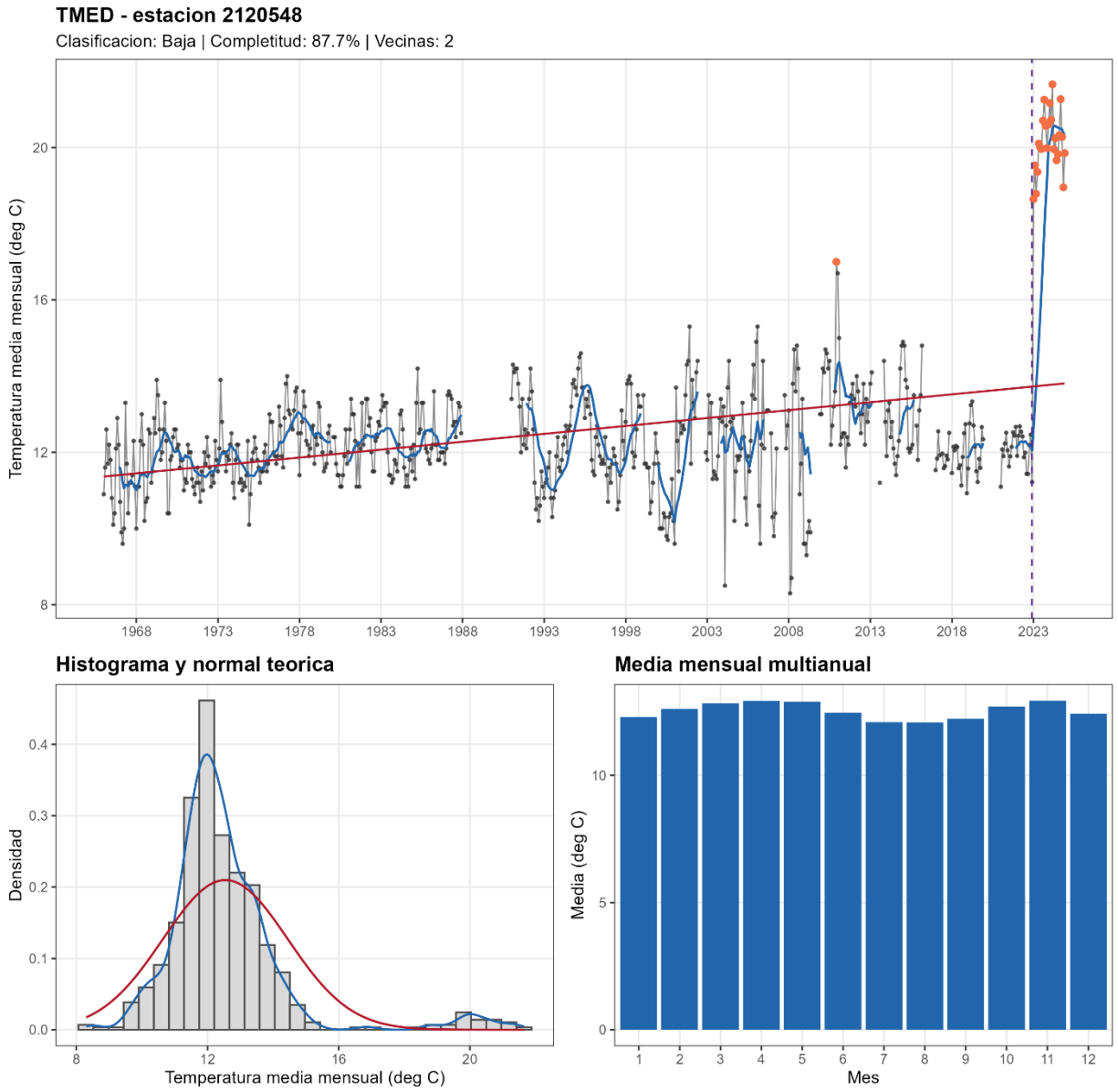
Las figuras individuales por estación permiten documentar los principales elementos de diagnóstico: serie mensual, media móvil, posibles quiebres, tendencia, outliers, climatología mensual y clasificación final. En las otras variables climatológicas, estas figuras son especialmente útiles para diferenciar entre una posible inconsistencia y una señal climática o hidrológica real.

Las estaciones prioritarias para revisión son aquellas que combinan baja completitud, alto número de outliers, cambio de media, cambio de varianza, SNHT significativo, tendencia significativa o ausencia de vecinas regionales. Entre los casos más relevantes se destacan:

- TMAX: 2120541 – REPRESA DEL NEUSA, 2120565 – TABIO y 2401521 – SUTATAUSA.
- TMED: 2120548 – IBERIA LA, 2120565 – TABIO y 2123502 – PLACER EL.
- TMIN: 21205660 – MERCEDES, 2306507 – ESC VOCACIONAL PACHO y 21206690 – COLEGIO MIGUEL A. CARO.
- Brillo solar: 2120562 – GUATAVITA, 2120631 – TISQUESUSA y 2120629 – VENECIA.
- Humedad relativa: 2401521 – SUTATAUSA y 2120559 – APTO GUAYMARAL.
- Velocidad del viento: 2120644 – ARGELIA, 2120647 – ESPERANZA LA y 2120561 – MUÑA EL.
- Caudal medio: 2120933 – PTE FERROCARRIL, 2120875 – PTE CHECUA, 2120785 – MOLINO EL y 2401729 – PTE COLORADO.

Nuevamente, como ejemplo se coloca el análisis individual para la variable de temperatura media de la estación La Iberia (2120548).

Figura 10. Ejemplo de diagnóstico individual por estación para la temperatura media en la estación La Iberia (2120548).



Fuente: Elaboración propia

Para el caso de temperatura donde se puede realizar la validación cruzada entre temperaturas máximas, medias y mínimas, se detectan las inconsistencias de la Tabla 18.

Tabla 18. Registros específicos con inconsistencias físicas entre TMAX, TMED y TMIN.

Criterio	Código	Estación	Fecha	TMAX	TMED	TMIN	Amplitud
TMED<TMIN	2120548	IBERIA LA	2006-10	16,5	13,1	14,0	2,5
TMED<TMIN; TMAX<TMIN; Amp.<0	2120559	APTO GUAYMARAL	2003-08	16,8	7,7	17,0	-0,2
TMED<TMIN; TMAX<TMIN; Amp.<0	2120559	APTO GUAYMARAL	2003-09	16,0	7,3	19,4	-3,4
TMED<TMIN	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-01	23,8	8,5	19,0	4,8
TMED<TMIN; TMAX<TMIN; Amp.<0	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-02	22,0	9,3	23,6	-1,6
TMED<TMIN	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-05	21,0	10,8	19,4	1,6
TMED<TMIN	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-06	18,0	9,0	15,2	2,8
TMED<TMIN	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-07	19,0	9,6	17,4	1,6
TMED<TMIN; TMAX<TMIN; Amp.<0	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-09	18,0	10,5	20,6	-2,6
TMED<TMIN	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-10	21,6	9,4	17,4	4,2
TMED<TMIN; TMAX<TMIN; Amp.<0	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-11	20,4	8,8	21,6	-1,2
TMED<TMIN; TMAX<TMIN; Amp.<0	2120559	APTO GUAYMARAL	2004-12	21,6	8,3	22,0	-0,4
TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2003-09	7,8	—	8,0	-0,2
TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2004-01	2,7	—	5,0	-2,3

Criterio	Código	Estación	Fecha	TMAX	TMED	TMIN	Amplitud
TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2004-02	2,0	—	5,0	-3,0
TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2004-03	2,0	—	7,0	-5,0
TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2004-04	1,9	—	7,0	-5,1
TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2004-06	1,9	—	8,0	-6,1
TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2004-11	1,9	—	7,0	-5,1
TMAX<TMED ; TMAX<TMIN; Amp.<0	2120562	GUATAVITA	2011-08	0,0	13,0	4,6	-4,6
TMED<TMIN	2120562	GUATAVITA	2011-09	21,2	0,0	3,8	17,4
TMED<TMIN	2120565	TABIO	2023-03	15,31	12,23	12,30	3,01
TMED<TMIN	2120565	TABIO	2023-04	15,49	12,47	12,64	2,85
TMED<TMIN	2120565	TABIO	2023-06	14,97	11,69	12,01	2,96
TMED<TMIN	2120565	TABIO	2023-07	15,49	11,52	11,72	3,77
TMAX<TMED	2120629	VENECIA	2003-07	11,0	13,3	1,0	10,0
TMED<TMIN	2120630	DOÑA JUANA	2004-11	20,0	12,9	16,0	4,0
TMED<TMIN	2120639	MESA LA	2004-11	28,5	23,1	25,0	3,5
TMED<TMIN	2120639	MESA LA	2004-12	29,5	23,3	27,0	2,5
TMAX<TMED	2120647	ESPERANZA LA	2003-06	24,2	26,6	14,0	10,2

Criterio	Código	Estación	Fecha	TMAX	TMED	TMIN	Amplitud
TMAX<TMIN; Amp.<0	2401521	SUTATAUSA	2003-07	2,3	—	7,0	-4,7
TMAX<TMIN; Amp.<0	2401521	SUTATAUSA	2003-08	2,8	—	8,0	-5,2
TMAX<TMIN; Amp.<0	2401521	SUTATAUSA	2003-09	2,7	—	8,0	-5,3
TMAX<TMIN; Amp.<0	2401521	SUTATAUSA	2003-10	2,8	—	9,0	-6,2
TMAX<TMIN; Amp.<0	2401521	SUTATAUSA	2003-11	2,6	—	6,0	-3,4
TMAX<TMIN; Amp.<0	2401521	SUTATAUSA	2004-03	2,9	—	6,0	-3,1

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.11 CLASIFICACIÓN FINAL Y BALANCE GENERAL

La clasificación final (Ver Tabla 19) muestra que no se obtuvieron estaciones en categoría Alta para las variables analizadas. Solo una estación fue clasificada como Moderada: 2401519 – NOVILLEROS, en brillo solar. El resto de estaciones suficientes fue clasificado como Baja, principalmente por la combinación de cambios de media, cambios de varianza, tendencias significativas y SNHT significativo.

Tabla 19. Clasificación final de estaciones por variable.

Variable	Alta	Moderada	Baja	Insuficiente
TMAX	0	0	24	16
TMED	0	0	24	22
TMIN	0	0	38	15
Brillo solar	0	1	12	12
Humedad relativa	0	0	11	8
Velocidad del viento	0	0	4	18
Caudal medio	0	0	63	76

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 20 se detalla los resultados de consistencia que motivan la clasificación de las estaciones como Insuficientes, incluyendo los resultados desfavorables o de clasificación baja para cambios en la media, en la varianza, SHNT, tendencia significativa y total de valores anómalo (outliers).

Tabla 20. Causa clasificación "Insuficiente" por variable.

Variable	Criterio de insuficiencia	Núm. estac.	Media baja	Var. baja	Tend. sig.	SNHT baja	Sin vecinas	Outliers	Decisión preliminar
TMAX	Comp. 70–<80 % y <20 años	1	1	1	1	1	0	1	Uso auxiliar, no histórico
VV	Comp. 70–<80 % y ≥20 años	1	1	1	1	1	0	13	Continuar condicionada
VV	Comp. ≥80 % y <20 años	1	0	0	0	0	0	0	Uso reciente, no histórico
TMED	Comp. 70–<80 % y ≥20 años	2	2	1	1	1	1	1	Continuar condicionada
TMIN	Comp. 70–<80 % y <20 años	2	2	2	2	1	1	46	Uso auxiliar, no histórico
BS	Comp. 70–<80 % y <20 años	2	2	1	2	1	1	5	Uso auxiliar, no histórico
BS	Comp. ≥80 % y <20 años	2	1	0	0	0	0	0	Uso reciente, no histórico
TMAX	Comp. 70–<80 % y ≥20 años	3	3	2	1	2	1	9	Continuar condicionada
TMAX	Comp. ≥80 % y <20 años	3	0	0	0	0	2	13	Uso reciente, no histórico
TMED	Comp. 70–<80 % y <20 años	3	3	1	1	1	2	13	Uso auxiliar, no histórico
TMIN	Comp. 70–<80 % y ≥20 años	3	2	1	1	1	2	4	Continuar condicionada

Variable	Criterio de insuficiencia	Núm. estac.	Media baja	Var. baja	Tend. sig.	SNHT baja	Sin vecinas	Outliers	Decisión preliminar
BS	Comp. 70–<80 % y ≥20 años	3	2	0	2	3	0	9	Continuar condicionada
HR	Comp. <70 %	3	3	0	2	3	0	6	Retirar del análisis principal
QMED	Comp. 70–<80 % y <20 años	3	1	1	1	2	1	15	No retirar en esta fase
TMIN	Comp. ≥80 % y <20 años	4	1	1	1	1	1	24	Uso reciente, no histórico
BS	Comp. <70 %	5	1	1	1	3	1	14	Retirar del análisis principal
HR	Comp. 70–<80 % y ≥20 años	5	5	4	5	3	1	33	Continuar condicionada
TMED	Comp. ≥80 % y <20 años	6	2	1	2	2	4	9	Uso reciente, no histórico
TMIN	Comp. <70 %	6	3	4	3	3	3	4	Retirar del análisis térmico principal
VV	Comp. <70 %	6	6	5	5	3	2	30	Retirar del análisis principal
TMAX	Comp. <70 %	9	4	3	4	4	4	48	Retirar del análisis térmico principal
VV	Comp. 70–<80 % y <20 años	10	8	4	8	5	3	33	Uso auxiliar, no histórico
TMED	Comp. <70 %	11	5	3	3	2	6	40	Retirar del análisis

Variable	Criterio de insuficiencia	Núm. estac.	Media baja	Var. baja	Tend. sig.	SNHT baja	Sin vecinas	Outliers	Decisión preliminar
									térmico principal
QMED	Comp. 70–<80 % y ≥20 años	13	10	12	5	10	1	193	No retirar en esta fase
QMED	Comp. <70 %	17	13	9	9	12	1	129	No retirar en esta fase
QMED	Comp. ≥80 % y <20 años	43	20	20	15	22	11	315	No retirar en esta fase

Fuente: Elaboración propia

- **Interpretación conjunta para TMAX, TMED y TMIN**

Para temperatura, la decisión no se hace de forma aislada por variable, sino considerando conjuntamente TMAX, TMED y TMIN. Bajo este criterio, deben retirarse del análisis térmico principal las estaciones que presentan insuficiencia severa en dos o tres variables, especialmente cuando además tienen cambio de media, cambio de varianza, tendencia o SNHT desfavorable.

Así, deben retirarse del análisis las estaciones: REPRESA SISGA, REPRESA DEL NEUSA, TABIO, TISQUESUSA, ACOMODO EL, CARRIZAL, PUNTA DE VEGA, BASE AÉREA MADRID, LA COSECHA, SAN CAYETANO y COLEGIO MIGUEL A. CARO.

Estas 11 estaciones combinan baja completitud o longitud insuficiente con señales adicionales de inconsistencia. En varios casos, además, las pruebas de media, varianza, tendencia y SNHT resultan desfavorables, por lo cual no conviene usarlas como base térmica principal.

- **Interpretación para brillo solar, humedad relativa y viento**

Para brillo solar, deben retirarse del análisis principal las estaciones con completitud menor al 70 %: RAMADA LA, GUATAVITA, TABIO, FORTUNA LA y ACOMODO EL. Las estaciones CHECUA, REPRESA DEL NEUSA y MESA LA pueden continuar condicionadas, aunque todas presentan SNHT bajo y deben revisarse.

Para humedad relativa, las estaciones PLACER EL, ESC VOCACIONAL PACHO y ACOMODO EL deben retirarse del análisis principal por completitud menor al 70 %, reforzada por cambio de media y SNHT desfavorable. Las estaciones APTO GUAYMARAL, VENECIA, ESC SAMPER MADRID, CARRIZAL y SUTATAUSA pueden continuar solo con revisión, pues aunque superan el 70 %, presentan señales importantes de cambio en media, varianza, tendencia o SNHT.

Para velocidad del viento, la red es la más débil. Deben retirarse del análisis principal MUÑA EL, GUATAVITA, FORTUNA LA, MESA LA, ARGELIA y ACOMODO EL. CHECUA puede continuar condicionada, pero presenta cambio de media, cambio de varianza, tendencia y SNHT desfavorable. Las estaciones con menos de 20 años deben reservarse para apoyo o periodo reciente, no como series históricas.

- **Caudal medio**

Para QMED no se recomienda retirar estaciones en esta primera fase, aun cuando varias estén clasificadas como Insuficientes. La decisión sobre conservar o excluir estaciones de caudal debe hacerse en la etapa específica de modelación hidrológica por cuenca, considerando su área aferente, ubicación en la red de drenaje, regulación, captaciones, vertimientos, continuidad hidrológica y utilidad para calibración o validación.

Por tanto, en caudales la clasificación Insuficiente debe entenderse como una alerta de prioridad de revisión, no como criterio de retiro inmediato.

4.1.4.12 MODIFICACIONES REALIZADAS A LOS DATOS EXISTENTES PARA MEJORAR CONSISTENCIA DE LAS SERIES

Cambios realizados

Para las variables TMAX, TMED, TMIN, brillo solar, humedad relativa y velocidad del viento se generó una nueva versión de las series consistentes, aplicando los retiros de estaciones y de los valores anómalos identificados anteriormente y empleando el paquete Climatol como apoyo para corregir o reemplazar registros puntuales inconsistentes. El procedimiento sigue el mismo criterio descrito para precipitación: construir una referencia regional, comparar cada estación contra su entorno y ajustar los registros que se apartan del comportamiento esperado, sin modificar automáticamente estaciones o datos que no hayan sido definidos previamente en las acciones de consistencia.

En esta etapa no se modificaron los valores de caudal medio (QMED). Para esta variable se mantiene la base original, debido a que su depuración debe realizarse posteriormente en la etapa específica de modelación hidrológica por cuenca, considerando área aferente, regulación, derivaciones, captaciones y coherencia hidrológica local.

Las acciones aplicadas fueron las siguientes:

Tabla 21. Acciones aplicadas en la corrección por consistencia.

Variable	Estaciones retiradas	Registros puntuales corregidos o retirados
TMAX	11	110
TMED	11	97
TMIN	11	174
Brillo solar	5	27

Variable	Estaciones retiradas	Registros puntuales corregidos o retirados
Humedad relativa	3	29
Velocidad del viento	6	57

Fuente: Elaboración propia

Para las variables térmicas, las estaciones retiradas corresponden a la decisión conjunta sobre TMAX, TMED y TMIN, de manera que no se retiraron estaciones de forma aislada por una sola variable, sino únicamente aquellas con problemas suficientes para excluirlas del análisis térmico principal.

Efecto del ajuste de consistencia en las características de las series

Después de aplicar las acciones de consistencia, el número de estaciones disponibles disminuye en cada variable debido al retiro de estaciones poco confiables. El ajuste produce una mejora parcial en algunos indicadores, especialmente en la reducción de outliers y en la disminución de estaciones con SNHT bajo, aunque la clasificación final continúa siendo restrictiva (Ver Tabla 22).

Tabla 22. Efectos de las modificaciones por consistencia en la clasificación de consistencia por variable.

Variable	Clasificación original	Clasificación consistente	Outliers original → consistente	SNHT bajo original → consistente
TMAX	0 Alta, 0 Moderada, 24 Baja, 16 Insuf.	0 Alta, 0 Moderada, 26 Baja, 11 Insuf.	220 → 122	23 → 13
TMED	0 Alta, 0 Moderada, 24 Baja, 22 Insuf.	0 Alta, 1 Moderada, 26 Baja, 11 Insuf.	183 → 124	20 → 14
TMIN	0 Alta, 0 Moderada, 38 Baja, 15 Insuf.	0 Alta, 0 Moderada, 36 Baja, 6 Insuf.	321 → 218	30 → 20
Brillo solar	0 Alta, 1 Moderada, 12 Baja, 12 Insuf.	0 Alta, 0 Moderada, 13 Baja, 7 Insuf.	56 → 44	16 → 14

Humedad relativa	0 Alta, 0 Moderada, 11 Baja, 8 Insuf.	0 Alta, 0 Moderada, 11 Baja, 5 Insuf.	54 → 27	16 → 14
Velocidad del viento	0 Alta, 0 Moderada, 4 Baja, 18 Insuf.	0 Alta, 0 Moderada, 3 Baja, 13 Insuf.	111 → 86	13 → 10

Fuente: Elaboración propia

El resultado más favorable se observa en la reducción de estaciones con SNHT bajo y en la disminución de outliers. Sin embargo, la clasificación final no mejora de forma generalizada, porque persisten cambios de media, cambios de varianza, tendencias significativas y problemas de homogeneidad regional en varias estaciones.

Efecto sobre las pruebas de consistencia

Como se aprecia en la Tabla 23, el ajuste mejora parcialmente los indicadores de consistencia, aunque no elimina completamente las señales estadísticas desfavorables.

Tabla 23. Efectos de las modificaciones por consistencia en las pruebas de consistencia.

Variable	Cambio media bajo original → consistente	Cambio varianza bajo original → consistente	Tendencia significativa original → consistente
TMAX	31 → 30	23 → 20	24 → 25
TMED	35 → 30	22 → 15	28 → 27
TMIN	46 → 38	27 → 19	41 → 34
Brillo solar	17 → 16	9 → 7	13 → 12
Humedad relativa	19 → 16	9 → 10	18 → 16
Velocidad del viento	19 → 13	12 → 8	18 → 13

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, las mayores mejoras se presentan en TMIN, TMED y velocidad del viento, donde disminuyen las estaciones con cambio de media, cambio de varianza, tendencia significativa y SNHT bajo. En humedad relativa, aunque disminuyen los outliers y algunas señales de cambio, el cambio de varianza bajo aumenta ligeramente, por lo que esta variable debe revisarse con cuidado.

Efecto sobre los estadísticos principales

La comparación entre las características originales y consistentes muestra que el ajuste no altera de forma importante el nivel medio de las estaciones. La correlación entre las medias

originales y consistentes es prácticamente igual a 1,0 en todas las variables, lo que indica que el patrón espacial general de cada variable se conserva.

Tabla 24. Efectos de las modificaciones por consistencia en los estadísticos principales.

Variable	Cambio media bajo original → consistente	Correlación media original-consistente	Correlación desviación estándar original-consistente	Estaciones con cambio de media >10 %
TMAX	31 → 30	1,00	0,936	0
TMED	35 → 30	1,00	0,910	0
TMIN	46 → 38	1,00	0,982	0
Brillo solar	17 → 16	1,00	0,997	0
Humedad relativa	19 → 16	0,998	0,666	0
Velocidad del viento	19 → 13	1,00	1,00	0

Fuente: Elaboración propia

Esto indica que el ajuste fue principalmente puntual y no modificó de forma sustancial las condiciones medias de las estaciones. Los cambios más sensibles se presentan en la desviación estándar de algunas estaciones de temperatura y en humedad relativa, lo cual es esperable cuando se corrigen valores extremos o registros puntuales inconsistentes.

Balance general

El proceso de consistencia para las variables climatológicas permite depurar la base de trabajo y reducir señales puntuales de inconsistencia, especialmente outliers y rupturas regionales. No obstante, las series consistentes no deben interpretarse automáticamente como series de alta confiabilidad. La mayoría de las estaciones continúa clasificada como Baja, debido a señales persistentes de cambio en media, cambio en varianza, tendencia o SNHT bajo.

En conclusión, el ajuste mejora la consistencia operativa de la base, reduce outliers y mejora parcialmente la homogeneidad regional, por lo que las series consistentes pueden utilizarse como una versión mejorada para análisis posteriores

4.2 COMPLETADO DE SERIES

El llenado y la extensión de las series hidrológicas tienen como propósito conformar registros continuos y temporalmente comparables dentro de un período suficientemente largo y representativo, de manera que puedan emplearse con confiabilidad en la elaboración del balance hídrico. La selección de una ventana temporal adecuada permite incorporar años secos, medios y húmedos, representar la variabilidad estacional e

interanual y reducir la influencia que años particulares podrían ejercer sobre los valores medios y los totales utilizados en el análisis.

No obstante, ampliar una serie hacia años con menor disponibilidad de observaciones no implica necesariamente una mejora en su calidad. A medida que aumenta la longitud del período reconstruido, también puede incrementarse la proporción de datos estimados frente a los valores efectivamente observados, así como la dependencia de relaciones estadísticas establecidas con estaciones vecinas o con fuentes auxiliares de información. Cuando estas relaciones son débiles, presentan variaciones temporales o se dispone de una menor cobertura de estaciones, la confiabilidad de la serie puede disminuir y las métricas o indicadores de desempeño pueden tornarse menos favorables. Esto puede reflejarse en valores más altos de RMSE o MAE, un KGE más bajo, un mayor sesgo o una mayor dispersión de los errores y, en términos hidrológicos, en un deterioro general de los estadísticos de ajuste.

Por esta razón, para la variable precipitación se evaluaron inicialmente once ventanas comprendidas entre 1995–2024 y 2005–2024, con duraciones entre 30 y 20 años. El propósito fue determinar si la reducción de la longitud del período producía mejoras relevantes en las métricas de validación y en los indicadores de ajuste. Como se analiza posteriormente, aunque algunas ventanas más cortas presentaron resultados numéricos ligeramente mejores, la disminución de los errores y la mejora de las medidas de desempeño no fueron sustanciales. En consecuencia, no se considera técnicamente justificado reducir la longitud de la serie y perder representatividad hidroclimática únicamente para obtener una mejora marginal en las métricas. Por tanto, se adopta el período 1995–2024, de 30 años, para los procesos de completado y extensión de los registros.

Este período ofrece un equilibrio adecuado entre longitud de la serie, representatividad hidroclimática y calidad estadística. Su duración es consistente con el criterio de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2017), que establece períodos consecutivos de 30 años para el cálculo de las normales climatológicas estándar y reconoce la necesidad de emplear referencias de largo plazo para representar adecuadamente la variabilidad natural del clima. Debe precisarse que el período 1995–2024 no corresponde a una normal climatológica estándar oficial de la OMM —cuya referencia vigente es 1991–2020—, pero sí conserva la duración de 30 años recomendada para conformar una referencia climática robusta y adecuada para el desarrollo del balance hídrico

4.2.1 PROCESO DE COMPLETADO Y EXTENSIÓN DE REGISTROS E INDICADORES PARA VALIDACIÓN DEL PROCESO

4.2.1.1 METODOLOGÍA DE COMPLETADO

De acuerdo con el tipo de variable climatológica analizada, se seleccionan las metodologías más apropiadas para los procesos de completado y extensión de las series. Los fundamentos, requisitos y criterios de aplicación de cada método se presentan en las secciones siguientes.

La aplicación y evaluación de cada metodología comprende, en términos generales, las siguientes etapas:

1. Identificación de los registros observados disponibles en cada estación y dentro del período de análisis.

2. Selección y retiro temporal de una parte de los datos observados, cuyos valores originales se conservan exclusivamente como referencia para la validación.
3. Aplicación de la metodología de completado utilizando únicamente la información que permanece disponible.
4. Estimación de los registros que fueron ocultados temporalmente.
5. Comparación de los valores estimados con los datos observados originales.
6. Cálculo de las métricas de desempeño a partir de las diferencias obtenidas.

La calidad de cada metodología se evalúa mediante validación cruzada. Esta técnica consiste en retirar temporalmente una parte de los registros observados y consistentes, tratarlos como datos faltantes y estimarlos nuevamente mediante cada uno de los métodos analizados. Posteriormente, cada valor estimado se compara con el correspondiente dato observado, y el error de estimación se define como:

$$e_i = \hat{P}_i - P_i \quad (1)$$

donde:

- $\hat{P}_i$es la precipitación mensual estimada;
- $P_i$es la precipitación mensual observada y retirada temporalmente;
- $e_i$es el error asociado a la estimación.

Un valor $e_i > 0$indica que el método sobreestima la precipitación observada, mientras que $e_i < 0$representa una subestimación. Cuando el error es igual o cercano a cero, la estimación reproduce adecuadamente el valor observado.

Con los pares de valores observados y estimados se calculan, en primer lugar, las métricas de validación correspondientes a cada estación. Esta evaluación individual permite identificar posibles diferencias en el desempeño del método entre estaciones, asociadas, por ejemplo, con la disponibilidad de datos, la densidad de la red, la correlación espacial o la variabilidad climática local.

Posteriormente, todos los valores validados de las diferentes estaciones se reúnen en un único conjunto y las mismas métricas se calculan nuevamente a nivel global. En consecuencia, la evaluación global no corresponde al promedio de las métricas individuales por estación, sino al cálculo directo de cada indicador utilizando conjuntamente todos los pares observado–estimado de la red. Bajo este esquema, las estaciones que aportan un mayor número de datos validados tienen una participación proporcionalmente mayor en el resultado global. Esta agregación permite valorar el desempeño general de cada metodología para el conjunto de estaciones y períodos analizados.

Este procedimiento debe diferenciarse del completado definitivo de las series. Durante la validación cruzada se estiman valores observados que fueron ocultados deliberadamente y cuyo valor real es conocido, lo que permite cuantificar objetivamente el error del método. Una vez seleccionadas la metodología y la ventana temporal de mejor desempeño, el procedimiento se ejecuta nuevamente utilizando la totalidad de los datos observados

disponibles, con el fin de estimar los faltantes reales y extender las series dentro del período adoptado

4.2.1.2 INDICADORES O MÉTRICAS PARA VALIDACIÓN DEL PROCESO

Las métricas empleadas para la validación cruzada, tanto para cada estación como de manera global son RMSE, MAE, KGE y sesgo, las cuales se describen a continuación.

1. Raíz del error cuadrático medio — RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \quad (P_i)^2} \qquad (2)$$

El RMSE mide la magnitud promedio del error, dando mayor peso a las diferencias grandes debido a que los errores se elevan al cuadrado.

Interpretación:

- Su valor ideal es cero.
- Cuanto menor sea el RMSE, mayor es la precisión del método.
- Se expresa en las mismas unidades de la variable; en este caso, milímetros de precipitación mensual.
- Es especialmente útil para identificar metodologías que producen errores extremos o estimaciones muy alejadas de los valores observados.
- No posee un límite universal de aceptación, por lo que debe compararse entre métodos, estaciones y períodos con magnitudes de precipitación semejantes.

2. Error absoluto medio — MAE

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \quad | \hat{P}_i - P_i | \qquad (3)$$

El MAE representa la magnitud promedio de las diferencias absolutas entre los valores estimados y observados, sin considerar el signo del error.

Interpretación:

- Su valor ideal es cero.
- Un MAE menor indica mayor proximidad entre los valores estimados y observados.
- Se expresa en milímetros.
- Es menos sensible a errores extremos que el RMSE.
- Puede interpretarse directamente como el error absoluto mensual típico del método.

La comparación entre RMSE y MAE permite identificar la presencia de errores grandes. Cuando el RMSE es considerablemente mayor que el MAE, significa que existen algunos errores extremos que están aumentando la medida cuadrática.

3. Sesgo medio

$$Sesgo = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \quad (\hat{P}_i - P_i) \qquad (4)$$

El sesgo mide la tendencia sistemática de una metodología a sobreestimar o subestimar la precipitación.

Interpretación:

- Un sesgo igual o cercano a cero indica ausencia de desviación sistemática.
- Un sesgo positivo señala que el método tiende a sobreestimar la precipitación.
- Un sesgo negativo indica una tendencia a subestimar.
- Cuanto menor sea su valor absoluto, mejor será el comportamiento del método.

Debe analizarse junto con el RMSE y el MAE. Un método puede tener sesgo cercano a cero y, aun así, presentar errores individuales elevados, debido a que las sobreestimaciones y subestimaciones pueden compensarse entre sí.

4. Eficiencia Kling-Gupta — KGE

En su formulación habitual, el KGE se calcula como:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \qquad (5)$$

donde:

$$\alpha = \frac{\sigma_{\hat{P}}}{\sigma_P}, \ \beta = \frac{\hat{P}^-}{P^-} \qquad (6)$$

y:

- r: correlación entre los valores estimados y observados.
- α: relación entre las desviaciones estándar, asociada con la reproducción de la variabilidad.
- β: relación entre las medias, asociada con el sesgo relativo.

El KGE evalúa simultáneamente tres aspectos: correspondencia temporal, conservación de la variabilidad y reproducción de la magnitud media.

Interpretación:

- El valor óptimo es 1.
- Cuanto más próximo a 1, mejor es el desempeño conjunto del método.
- Valores reducidos o negativos indican una reproducción deficiente de uno o varios componentes.
- Un KGE elevado no garantiza por sí solo errores pequeños, por lo que debe complementarse con RMSE, MAE y sesgo.
- No existe un umbral único aplicable a todos los estudios; su interpretación debe hacerse comparativamente y considerando la finalidad hidrológica.

En este análisis, el KGE permite verificar que el método no solamente reduzca los errores, sino que también reproduzca adecuadamente la variación y el comportamiento temporal de la precipitación.

4.2.1.3 COMPLETADO DE SERIES DE PRECIPITACIÓN

4.2.1.3.1 METODOLOGÍAS EMPLEADAS

Para el completado y la extensión de las series mensuales de precipitación se evaluaron cinco metodologías: razón normal, regresión lineal, CHIRPS calibrado, Random Forest y kriging. Cada una aprovecha una fuente de información diferente: proporcionalidad climatológica entre estaciones, relaciones estadísticas lineales, información pluviométrica grillada, relaciones multivariadas no lineales y dependencia espacial, respectivamente. Su desempeño se comparó mediante el mismo procedimiento de validación cruzada.

1. Razón normal

La razón normal estima la precipitación faltante de una estación a partir de los registros simultáneos de estaciones vecinas, corregidos según las diferencias climatológicas entre estas y la estación objetivo:

$$\hat{P}_{x,t,m} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} \left(\frac{N_{x,m}}{N_{j,m}} P_{j,t,m}\right) \quad (7)$$

donde $\hat{P}_{x,t,m}$es la precipitación estimada en la estación objetivo x, $P_{j,t,m}$es la precipitación observada en la estación vecina j, $N_{x,m}$y $N_{j,m}$son las medias mensuales de la estación objetivo y la vecina, respectivamente, y $k$es el número de estaciones disponibles.

El cociente $N_{x,m}/N_{j,m}$ajusta cada registro vecino a la escala pluviométrica de la estación objetivo, evitando trasladar directamente diferencias sistemáticas asociadas con la localización, altitud o régimen de precipitación. La formulación empleada corresponde a una adaptación mensual del método de razón normal presentado por Paulhus y Kohler (1952), quienes lo propusieron como una alternativa práctica para estimar registros de precipitación faltantes.

Es un método transparente y de fácil trazabilidad, apropiado cuando existe una relación regional consistente y se dispone de estaciones vecinas con información simultánea. Sus principales limitaciones son la dependencia de la densidad y calidad de la red y su limitada capacidad para representar relaciones no lineales o efectos orográficos complejos.

2. Regresión lineal

La regresión lineal estima la precipitación de la estación objetivo mediante relaciones ajustadas con una o varias estaciones predictoras. En el presente análisis se incorpora también la estructura estacional mediante variables indicadoras mensuales:

$$\hat{P}_{x,t} = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j P_{j,t} + \sum_{m=1}^{11} \gamma_m I_{m,t} \quad (8)$$

donde $\beta_0$es el intercepto, $\beta_j$representa el aporte de cada estación predictora, $I_{m,t}$identifica el mes y $\gamma_m$representa el efecto estacional correspondiente.

Los coeficientes se estiman durante los períodos con información simultánea entre la estación objetivo y las predictoras. Posteriormente, el modelo se utiliza para estimar los meses faltantes. La metodología puede presentar buen desempeño cuando las relaciones entre estaciones son fuertes, aproximadamente lineales y estables. Estudios comparativos

sobre completado de precipitación han mostrado que la regresión lineal múltiple puede producir estimaciones competitivas, siempre que su desempeño se evalúe fuera de la muestra utilizada para ajustar el modelo (Sattari et al., 2017).

Sus limitaciones incluyen la sensibilidad a valores extremos, la multicolinealidad entre estaciones predictoras, los cambios temporales de correlación y la reducción de la cobertura cuando no se dispone simultáneamente de todos los predictores requeridos.

3. CHIRPS calibrado

CHIRPS, sigla de *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*, es un producto grillado que combina una climatología de alta resolución, estimaciones de precipitación derivadas de información satelital infrarroja y registros de estaciones terrestres. El producto original dispone de datos diarios, pentadales y mensuales con resolución espacial de 0,05° (Funk et al., 2015).

Para cada estación se extrae la serie de la celda correspondiente a su localización. Debido a que CHIRPS representa el promedio espacial de una celda y no una medición puntual, sus valores se calibran previamente con los registros observados de la estación:

$$\hat{P}_{x,t,m} = f_{x,m}\left(P_{x,t,m}^{CHIRPS}\right) \qquad (9)$$

donde $P_{x,t,m}^{CHIRPS}$es el valor extraído del producto grillado y $f_{x,m}$es la relación de calibración definida con los períodos de información común. Para las estaciones de precipitación los datos CHIRPS y su correlación con las series originales se presenta en el anexo 3.

La calibración busca reducir los sesgos sistemáticos y adaptar la magnitud y estacionalidad del producto a las condiciones locales. Su principal ventaja es la continuidad espacial y temporal, que permite estimar datos aun cuando no existan suficientes estaciones vecinas disponibles. Como limitación, la celda de CHIRPS puede no reproducir completamente la variabilidad puntual, los máximos mensuales o los efectos orográficos locales; por ello, la calibración y la validación con observaciones terrestres son indispensables. El artículo de Funk et al. (2015) constituye la referencia fundamental para la construcción, características y validación del producto CHIRPS.

4. Random Forest

Random Forest es una metodología de aprendizaje automático que combina numerosos árboles de regresión construidos con remuestras de los datos y subconjuntos aleatorios de predictores. La estimación final corresponde al promedio de las predicciones generadas por los árboles:

$$\hat{P}_{x,t} = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} \quad T_b(X_{x,t}) \qquad (10)$$

donde Bes el número de árboles, $T_b$es la predicción del árbol by $X_{x,t}$contiene las estaciones y variables temporales empleadas como predictores. El fundamento original del algoritmo fue desarrollado por Breiman (2001), quien lo definió como un conjunto de árboles aleatorizados cuyas predicciones se agregan para mejorar la capacidad de generalización.

Para el completado se utiliza un esquema iterativo de imputación multivariada. Inicialmente se asignan valores provisionales a los vacíos; posteriormente, cada estación incompleta se modela utilizando las demás estaciones y variables auxiliares, se actualizan sus valores faltantes y el procedimiento se repite hasta alcanzar el criterio de convergencia. Este

esquema se fundamenta en el algoritmo missForest de Stekhoven y Bühlmann (2012), diseñado para aprovechar relaciones no lineales e interacciones complejas entre variables.

La implementación se realiza mediante missRanger, alternativa computacionalmente eficiente basada en el algoritmo de Random Forest y en el motor ranger de Wright y Ziegler (2017).

Random Forest no supone relaciones lineales entre estaciones y puede representar interacciones, umbrales y cambios estacionales sin definirlos previamente mediante una ecuación. Como limitaciones, presenta una interpretación física menos directa y puede perder capacidad predictiva cuando las condiciones que se desean completar se encuentran fuera del rango representado en los datos de entrenamiento.

En el presente análisis, Random Forest se selecciona como metodología global única para completar y extender las 96 estaciones durante 1995–2024. Esta decisión se sustenta en los resultados de validación global y evita introducir diferencias artificiales derivadas de cambiar de método entre estaciones, meses o vacíos particulares.

5. Kriging

El kriging estima la precipitación en la estación objetivo mediante una combinación lineal ponderada de las observaciones disponibles en estaciones vecinas:

$$\hat{P}(x_0) = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i P(x_i) \quad (11)$$

sujeta a:

$$\sum_{i=1}^{k} \lambda_i = 1 \quad (12)$$

donde $\lambda_i$es el peso asignado a la estación i. Los pesos no dependen únicamente de la distancia, sino de la estructura de dependencia espacial representada por el variograma.

El fundamento del kriging consiste en obtener una estimación lineal insesgada con la menor varianza posible bajo el modelo espacial adoptado. La formulación teórica de la geoestadística y del proceso de estimación fue desarrollada por Matheron (1963).

En el análisis, el cálculo del variograma, su ajuste y la interpolación se implementan mediante el paquete gstat, desarrollado para el modelamiento, predicción y simulación geoestadística en R (Pebesma, 2004).

El método es apropiado cuando la precipitación presenta una estructura espacial reconocible y la red cuenta con una distribución suficiente de estaciones. Su desempeño puede deteriorarse cuando existen pocas estaciones simultáneas, una red irregular, grandes diferencias altitudinales, anisotropía o efectos orográficos que no se incorporan explícitamente en el modelo

4.2.1.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Se evaluaron cinco metodologías de completado —Random Forest, razón normal, regresión lineal, CHIRPS calibrado y kriging— en once ventanas comprendidas entre 1995–2024 y 2005–2024. Para cada combinación de método y período, las métricas globales se calcularon agrupando todos los pares observado–estimado obtenidos mediante validación cruzada en las estaciones disponibles. Por tanto, los resultados globales representan el desempeño conjunto de la red y otorgan una mayor ponderación a las estaciones que aportan más datos validados.

1. Resultados por metodología

La *Tabla 25* presenta el promedio de las métricas globales obtenidas por cada metodología en las once ventanas evaluadas. La desviación estándar del RMSE mide la estabilidad del método frente al cambio del período de análisis.

Tabla 25. Resultados globales por metodología para los once períodos evaluados

Metodología	RMSE medio (mm)	Desv. RMSE (mm)	MAE medio (mm)	KGE medio	Sesgo medio (mm)
Random Forest	33,12	0,44	22,50	0,751	+0,50
Razón normal	33,61	0,42	22,48	0,787	−0,63
Regresión lineal	35,61	1,77	23,81	0,812	+0,27
CHIRPS calibrado	37,60	0,57	26,03	0,728	+0,16
Kriging	40,26	0,95	26,59	0,690	−0,40

Fuente: Elaboración propia

El método Random Forest presenta el menor RMSE promedio, con 33,12 mm, y una baja variación entre períodos, lo que indica un comportamiento preciso y estable. Su sesgo medio de +0,50 mm corresponde a una sobreestimación global leve y de poca importancia frente a la magnitud de la precipitación mensual.

La razón normal presenta un desempeño muy cercano: su RMSE es solamente 0,49 mm mayor que el de Random Forest, registra el menor MAE y la menor desviación del RMSE entre períodos. Estos resultados muestran que se trata de una metodología estable, interpretable y con buen desempeño para reproducir la precipitación mensual. No obstante, su sesgo medio de −0,63 mm indica una ligera tendencia a la subestimación.

La regresión lineal alcanza el KGE más alto, lo cual refleja una buena reproducción conjunta de la correlación, la media y la variabilidad. Sin embargo, presenta una desviación del RMSE de 1,77 mm, considerablemente mayor que la de los demás métodos. En consecuencia, aunque puede obtener resultados muy favorables en algunas ventanas, su comportamiento es más sensible a la longitud del período y a la disponibilidad simultánea de estaciones predictoras.

CHIRPS calibrado presenta un sesgo medio cercano a cero, pero sus valores de RMSE y MAE son superiores a los de Random Forest, razón normal y regresión lineal. Esto indica que la corrección local reduce el desplazamiento sistemático del producto, aunque no elimina completamente los errores derivados de la diferencia entre la precipitación puntual observada y el valor promedio representado por la celda grillada.

Finalmente, kriging presenta el RMSE y el MAE más altos y el menor KGE. Aunque su sesgo medio es reducido, los resultados indican que la dependencia espacial representada

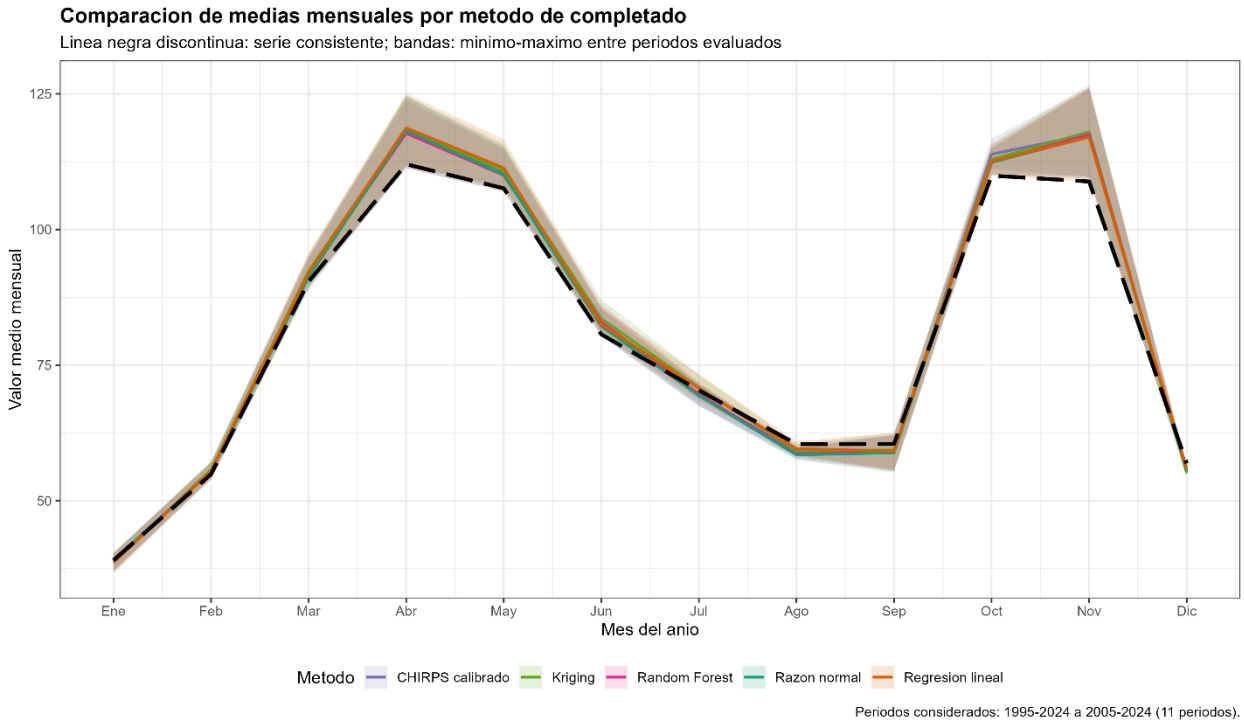
por el variograma no explica por sí sola toda la variabilidad temporal y local de la precipitación de las estaciones analizadas.

En conjunto, Random Forest y razón normal conforman el grupo de mejor desempeño. Random Forest resulta más favorable cuando se prioriza la reducción de los errores grandes, mientras que razón normal presenta una ligera ventaja en MAE, estabilidad e interpretación hidrológica.

- Comparación de las medias mensuales

A nivel gráfico, la Figura 11 muestra que las cinco metodologías reproducen el régimen bimodal de la precipitación, caracterizado por máximos en abril–mayo y octubre–noviembre, y mínimos relativos en enero–febrero y agosto–septiembre. Por tanto, ninguna metodología altera de manera sustancial la estructura estacional de la serie consistente.

Figura 11. Comparación de medias mensuales por método de completado



Fuente: Elaboración propia

Las líneas de los métodos se localizan ligeramente por encima de la serie consistente durante los períodos húmedos, principalmente en abril, mayo, octubre y noviembre. Esta diferencia indica una leve tendencia general a sobreestimar la precipitación media de los meses lluviosos. En contraste, durante los meses secos las diferencias son reducidas.

Las bandas mínimo–máximo son más estrechas en los meses secos y se amplían en los meses húmedos, lo que muestra que la sensibilidad al período aumenta con la magnitud y la variabilidad de la precipitación.

Tabla 26. Comparación de valores medios en relación al ancho de las bandas

Método	Desviación media mensual (mm)	Desviación máxima (mm)	Ancho medio de banda (mm)	Ancho máximo (mm)
Razón normal	2,35	8,23	6,17	16,35
Random Forest	2,42	8,68	6,10	16,47
Regresión lineal	2,43	8,14	6,54	17,19
CHIRPS calibrado	2,56	8,71	6,21	16,56
Kriging	2,71	9,14	6,28	16,73

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 26, la razón normal presenta la menor desviación media respecto de la climatología consistente, mientras que Random Forest muestra el menor ancho promedio de banda. Las diferencias entre razón normal, Random Forest y regresión lineal son pequeñas, por lo que la semejanza de las medias mensuales, considerada aisladamente, no permite definir la metodología final.

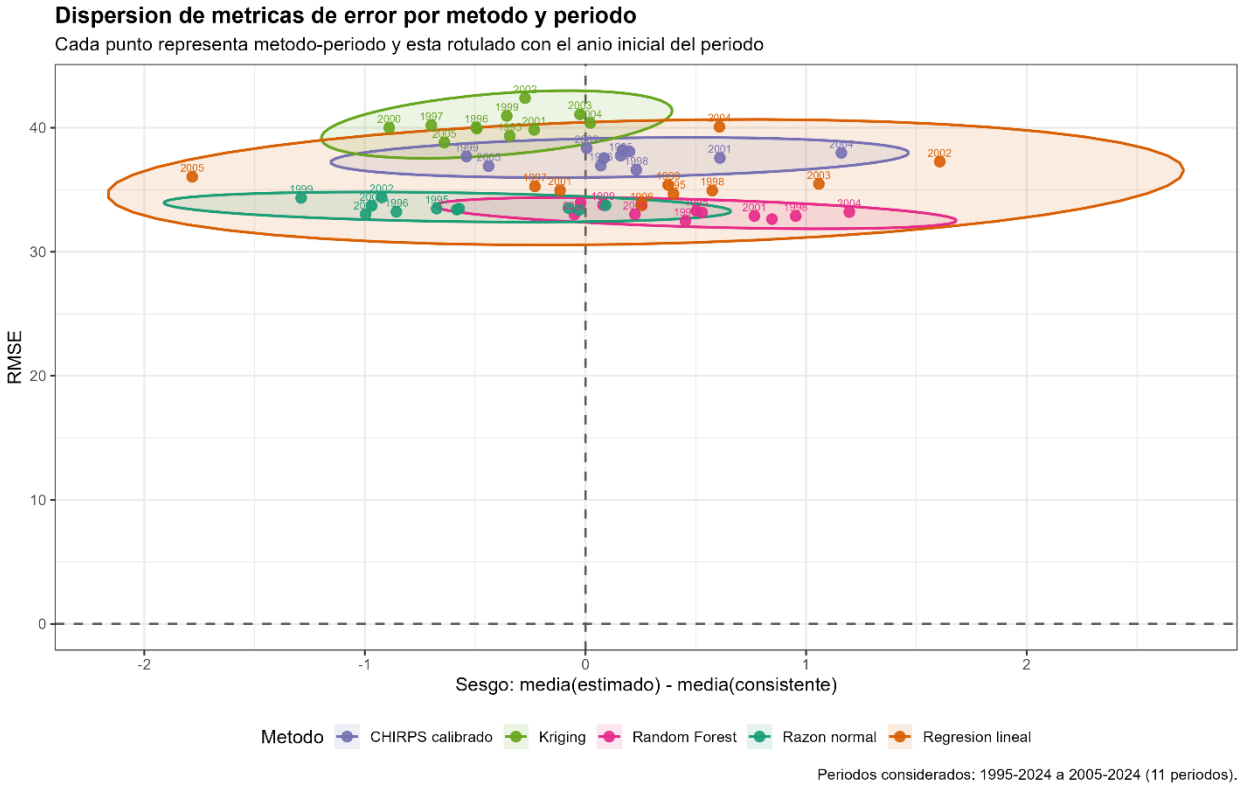
- Relación entre sesgo y RMSE

En la Figura 12, el comportamiento más favorable corresponde a los puntos ubicados cerca del eje de sesgo cero y en la zona de menor RMSE. Random Forest forma el grupo de puntos con menor RMSE y una dispersión reducida entre períodos. Su ubicación ligeramente a la derecha del eje vertical confirma una sobreestimación media pequeña.

La razón normal se localiza muy cerca de Random Forest en términos de RMSE, aunque sus puntos se concentran en el lado negativo del eje, indicando una ligera subestimación. Además, presenta la menor variación del RMSE entre ventanas.

La regresión lineal muestra una elipse considerablemente más amplia, tanto horizontal como verticalmente. Esto indica que su sesgo y su RMSE cambian más al modificar el año inicial. Algunos períodos producen resultados competitivos, pero el método no mantiene la misma estabilidad en las once ventanas.

Figura 12. Dispersión de sesgo y RMSE por método y período



Fuente: Elaboración propia

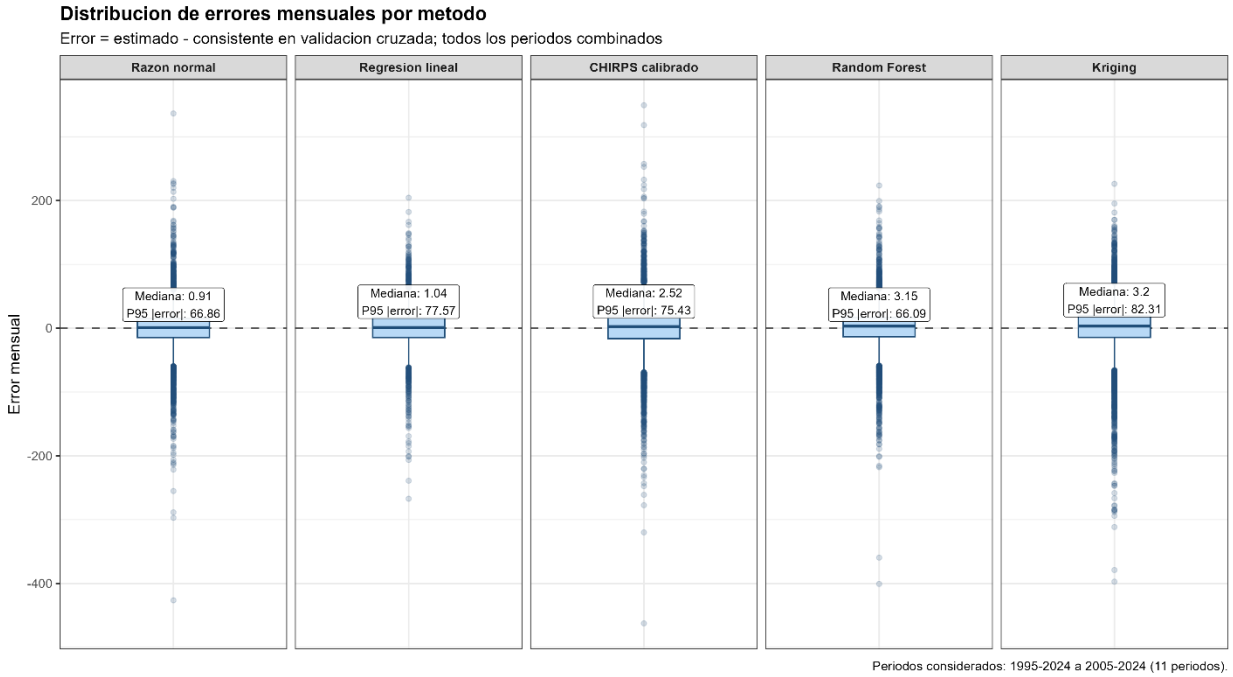
CHIRPS calibrado presenta un sesgo medio muy reducido, aunque sus valores de RMSE son mayores. Kriging muestra los RMSE más elevados, a pesar de mantener un sesgo promedio cercano a cero. Esto confirma que un sesgo pequeño no garantiza por sí solo una buena reproducción de los datos, pues las sobreestimaciones y subestimaciones pueden compensarse.

- Distribución de los errores mensuales

En la Figura 13, resumida en la Tabla 27, se aprecia que las medianas de error de todas las metodologías se encuentran próximas a cero. Esto indica que no existe un desplazamiento central severo; sin embargo, las diferencias en dispersión y en las colas de la distribución son importantes.

El método de la razón normal presenta la mediana más próxima a cero, lo que indica un buen centrado de los errores habituales. Random Forest, aunque tiene una mediana positiva algo mayor, presenta el menor percentil 95 del error absoluto, lo que significa que controla mejor los errores grandes relativamente frecuentes.

Figura 13. Distribución de errores mensuales por método



Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Errores mensuales por método

Método	Mediana del error (mm)	P95 del error absoluto (mm)
Razón normal	0,91	66,86
Regresión lineal	1,04	77,57
CHIRPS calibrado	2,52	75,43
Random Forest	3,15	66,09
Kriging	3,20	82,31

Fuente: Elaboración propia

Los métodos de Regresión lineal y CHIRPS calibrado tienen colas más amplias. Kriging presenta el mayor P95, con 82,31 mm, y una mayor presencia de errores extremos. La Figura 13 respalda, por tanto, la selección de Random Forest cuando el objetivo principal es minimizar la magnitud global del error y reducir la probabilidad de estimaciones muy alejadas del valor observado.

2. Resultados por período de análisis

La Tabla 28 resume el comportamiento de cada ventana temporal. Los valores corresponden al promedio entre las métricas globales obtenidas con las cinco metodologías.

Tabla 28. Resultados promedio por período evaluado

Período	Duración (años)	RMSE medio (mm)	MAE medio (mm)	KGE medio
1996–2024	29	35,28	23,80	0,747
1998–2024	27	35,55	24,04	0,752
2005–2024	20	35,56	24,08	0,756
2000–2024	25	35,63	24,00	0,756
1995–2024	30	35,70	23,72	0,745
2001–2024	24	35,74	24,20	0,761
1997–2024	28	36,05	24,15	0,747
2003–2024	22	36,16	24,61	0,766
1999–2024	26	36,42	24,61	0,745
2004–2024	21	37,08	24,92	0,765
2002–2024	23	37,27	24,94	0,752

Fuente: Elaboración propia

El período 1996–2024, de 29 años, presenta el menor RMSE promedio, con 35,28 mm. No obstante, el período 1995–2024, de 30 años, alcanza un RMSE de 35,70 mm, únicamente 0,42 mm superior. Esta diferencia equivale aproximadamente al 1,2 % y, por tanto, no constituye una mejora sustancial que justifique eliminar un año de información.

Adicionalmente, 1995–2024 presenta el menor MAE promedio de todas las ventanas, con 23,72 mm. Esto indica que, aunque algunos errores grandes incrementan ligeramente su RMSE, el error absoluto mensual habitual no resulta mayor que el de las ventanas más cortas.

El mayor KGE promedio corresponde a 2003–2024, con 0,766; sin embargo, esta ventana tiene solamente 22 años y presenta un RMSE de 36,16 mm. Por consiguiente, su mejora en KGE no está acompañada por una reducción equivalente del error y supone una pérdida importante de representatividad temporal.

Tampoco se observa una relación monotónica entre la reducción de la longitud y la mejora de las métricas. Por ejemplo, la ventana de 20 años presenta un RMSE competitivo, mientras que las ventanas de 21 y 23 años registran los valores más altos. Esto demuestra

que los resultados dependen de la composición hidroclimática de cada período y no únicamente de su duración.

La variación total entre ventanas es reducida:

- El RMSE se encuentra entre 35,28 y 37,27 mm.
- El MAE varía entre 23,72 y 24,94 mm.
- El KGE se encuentra entre 0,745 y 0,766.

En consecuencia, las mejoras obtenidas al acortar el período no son suficientemente importantes para compensar la pérdida de años secos, medios y húmedos necesaria para caracterizar adecuadamente el comportamiento hidroclimático y realizar el balance hídrico.

3. Metodología y período seleccionados

Aunque 1996–2024 presenta el menor RMSE promedio, la mejora respecto de 1995–2024 es marginal. Además, el período de 30 años presenta el menor MAE promedio y proporciona una representación temporal más amplia para el balance hídrico. Por estas razones se adopta 1995–2024 como período final.

Para esta ventana, Random Forest presenta los siguientes resultados:

Tabla 29. Resultados método Randon Forest, período 30 años

RMSE (mm)	MAE (mm)	KGE	Sesgo (mm)	Observados conservados	Faltantes rellenados	Remanentes
33,29	21,95	0,741	+0,50	30.675	3.885	0

Fuente: Elaboración propia

La serie final contiene 96 estaciones y 360 registros mensuales por estación, para un total de 34.560 valores. De estos, 30.675 corresponden a observaciones conservadas y 3.885 fueron estimados mediante Random Forest. No quedaron datos faltantes dentro del período final.

4. Cambios en los estadísticos de las estaciones

Los cambios se determinaron comparando los estadísticos del archivo original “01_caract_est_P.csv” del anexo 1 con los correspondientes al archivo final “03_caract_est_P_completas.csv” del anexo 3.

El archivo original contiene 107 estaciones, mientras que la serie completada incluye las 96 estaciones seleccionadas después del control de calidad. La comparación siguiente se realiza únicamente para las 96 estaciones comunes.

Debe señalarse que los estadísticos originales se calcularon sobre períodos efectivos variables, mientras que los estadísticos finales corresponden exclusivamente a 1995–2024. Por tanto, las variaciones observadas representan el efecto conjunto de:

- la selección del período común;
- la extensión de las series;

- el llenado de registros faltantes;
- el proceso previo de consistencia;
- y la incorporación o eliminación de años con características hidroclimáticas particulares.

En consecuencia, las diferencias no deben atribuirse exclusivamente a Random Forest.

Cambios generales

Los cambios medianos son inferiores al 6 % para todos los estadísticos analizados. Además, las correlaciones entre los valores originales y completados son superiores a 0,91 para la media, la mediana, la desviación estándar y el percentil 95. Estos resultados indican que, en términos generales, el proceso conserva la estructura espacial de las principales características estadísticas de la precipitación.

Tabla 30. Resumen de los cambios estadísticos en las 96 estaciones

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Media	5,54 %	10,07 %	0,929
Mediana	5,27 %	11,61 %	0,924
Desviación estándar	4,42 %	10,34 %	0,914
Coeficiente de variación	3,72 %	7,12 %	0,822
Percentil 95	4,06 %	12,13 %	0,922

Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de variación presenta una correlación menor, de 0,822, pero también el menor cambio absoluto mediano. La reducción de la correlación se debe a que este indicador combina los cambios de la media y de la desviación estándar, por lo que puede amplificar pequeñas modificaciones relativas en ambos componentes.

En cuanto a la magnitud de las variaciones:

- 72 de 96 estaciones presentan cambios de la media iguales o inferiores al 10 %.
- 71 estaciones presentan cambios de la desviación estándar iguales o inferiores al 10 %.
- En 88 estaciones, tanto los cambios de la media como los de la desviación estándar son inferiores o iguales al 20 % considerados individualmente.
- En 94 de las 96 estaciones, la media y la desviación estándar permanecen simultáneamente dentro del intervalo de ±30 %.

- Ninguna estación presenta cambios superiores al 30 % en el coeficiente de variación o en el percentil 95.

Estos resultados muestran que las modificaciones son, en general, moderadas y compatibles con un proceso que, además de completar vacíos, unifica todas las estaciones dentro de una ventana común de 30 años.

Evaluación de aceptabilidad

Para organizar la revisión se aplica un criterio operativo, no normativo:

- Aceptable: las variaciones permanecen en rangos moderados y no se activa ningún criterio de revisión.
- Aceptable con revisión: la media o la desviación estándar cambia entre 20 % y 30 %, la mediana supera el 30 %, el coeficiente de variación o el P95 supera el 20 %, o existe una alerta heredada del análisis de consistencia.
- No aceptable automáticamente: la media o la desviación estándar cambia más del 30 %. Esta clasificación no implica el descarte directo, sino la necesidad de efectuar una revisión individual antes de utilizar la estación.

Bajo los anteriores criterios, la clasificación final de las estaciones es**:**

Estaciones aceptables:	81 estaciones (84,4%)
Estaciones a revisar:	13 estaciones (13,5%)
Estaciones no aceptables:	2 estaciones (2,1%)

En la Tabla 31 se identifican las estaciones que requieren una revisión para la aceptación de la serie final completada.

Tabla 31. Estaciones que requieren revisión

Estación	Δ media	Δ mediana	Δ desviación estándar	Δ CV	Δ P95	Aceptabilidad
ACOMODO EL	−17,8 %	−15,0 %	−25,9 %	−9,8 %	−25,1 %	Revisión
CASITA LA	+19,2 %	+14,4 %	+22,0 %	+2,4 %	+21,4 %	Revisión
EL DORADO CATAM	−14,4 %	−13,9 %	−21,0 %	−7,7 %	−19,2 %	Revisión
GUARANI EL PEÑÓN	−9,5 %	−5,6 %	−24,5 %	−16,6 %	−20,6 %	Revisión
HACIENDA LORETOKI	+20,5 %	+30,1 %	+6,0 %	−12,0 %	+12,5 %	Revisión

Estación	Δ media	Δ mediana	Δ desviación estándar	Δ CV	Δ P95	Aceptabilidad
HATO No 7 EL	−20,3 %	−21,5 %	−13,7 %	+8,3 %	−22,5 %	Revisión
IBERIA LA	−21,3 %	−23,4 %	−20,8 %	+0,5 %	−20,9 %	Revisión
LA ESPERANZA	−22,8 %	−21,7 %	−27,4 %	−6,0 %	−25,1 %	Revisión
MARGARITAS LAS	+28,6 %	+40,0 %	+5,8 %	−17,8 %	+13,9 %	Revisión
MESA LA	−17,1 %	−11,7 %	−20,5 %	−4,1 %	−18,9 %	Revisión
PINO EL	+20,5 %	+25,2 %	+15,8 %	−3,9 %	+14,9 %	Revisión
SAN JOSÉ	+8,5 %	+11,6 %	−16,3 %	−22,9 %	+13,6 %	Revisión
VILLAPINZÓN	+22,6 %	+16,8 %	+19,9 %	−2,2 %	+25,6 %	Revisión
STA ISABEL	+32,9 %	+48,2 %	+18,9 %	−10,6 %	+16,1 %	No aceptable automáticamente
VIOTA	−9,7 %	+2,6 %	−34,6 %	−27,6 %	−21,5 %	No aceptable automáticamente

Fuente: Elaboración propia

Para estas 15 estaciones se recalculan los principales estadísticos de las series originales para el período 1995-2024 obteniendo las diferencias expuestas en la Tabla 32, donde se observa que solamente dos estaciones presentan cambios superiores al 30 %: San José y Viotá.

Tabla 32. Cambios reales en los estadísticos de las estaciones en revisión

Estación	Δ media	Δ mediana	Δ desv. estándar	Δ CV	Δ P95	Resultado
ACOMODO EL	−17,8 %	−15,0 %	−25,9 %	−9,8 %	−25,1 %	No supera 30 %
CASITA LA	+11,5 %	+9,0 %	+10,2 %	−1,1 %	+9,3 %	No supera 30 %

Estación	Δ media	Δ mediana	Δ desv. estándar	Δ CV	Δ P95	Resultado
EL DORADO CATAM	−18,9 %	−18,1 %	−24,6 %	−7,0 %	−23,6 %	No supera 30 %
GUARANI EL PEÑÓN	−13,5 %	−9,8 %	−24,7 %	−13,0 %	−23,0 %	No supera 30 %
HACIENDA LORETOKI	+1,9 %	+3,4 %	−1,1 %	−2,9 %	+0,4 %	No supera 30 %
HATO No 7 EL	−16,4 %	−16,8 %	−16,1 %	+0,3 %	−21,8 %	No supera 30 %
IBERIA LA	−19,0 %	−19,0 %	−20,6 %	−2,0 %	−20,4 %	No supera 30 %
LA ESPERANZA	−22,0 %	−21,6 %	−29,7 %	−9,9 %	−28,0 %	Cercana al umbral
MARGARITAS LAS	+0,7 %	+5,3 %	−10,0 %	−10,7 %	−7,6 %	No supera 30 %
MESA LA	−14,9 %	−11,9 %	−18,7 %	−4,5 %	−14,8 %	No supera 30 %
PINO EL	+20,5 %	+23,2 %	+11,3 %	−7,6 %	+14,8 %	No supera 30 %
SAN JOSÉ	−1,5 %	+4,6 %	−33,6 %	−32,6 %	−0,7 %	Supera 30 %
STA ISABEL	+45,4 %	+64,9 %	+30,2 %	−10,4 %	+19,6 %	Supera 30 %
VILLAPINZÓN	+17,9 %	+18,6 %	+10,6 %	−6,2 %	+5,1 %	No supera 30 %
VIOTA	−0,5 %	−1,2 %	−1,2 %	−0,7 %	−0,1 %	No supera 30 %

Fuente: Elaboración propia

- Estación San José (2120080)

La media, la mediana y el P95 prácticamente no cambian; sin embargo, la desviación estándar disminuye 33,6 % y el coeficiente de variación se reduce 32,6 %. La reducción se concentra principalmente en la cola extrema: el máximo original del período es 791,0 mm, mientras que en la serie completa es 288,3 mm.

Esto indica que el cambio no afecta de manera general la precipitación media ni los valores correspondientes al 95 % de la distribución, sino uno o pocos registros extremadamente altos. Estos registros excesivamente altos fueron retirados al compararlos con valores de

estaciones vecinas encontrándolos anómalos y al ser justificado este cambio en los estadísticos, la estación puede conservarse.

- Estación Sta. Isabel (2120176)

Presenta aumentos de 45,4 % en la media, 64,9 % en la mediana y 30,2 % en la desviación estándar. Además, su completitud original para 1995–2024 es de 98,9 %, equivalente a solo cuatro datos faltantes. Por tanto, estos cambios no pueden explicarse por el llenado de vacíos, sino principalmente por las modificaciones realizadas durante el proceso de consistencia.

Aunque la comparación previa con CHIRPS mostró una mejora de la correlación después de la consistencia, los cambios afectan ampliamente la tendencia de completado de datos, por lo que esta estación es retirada de los análisis hidrológicos.

5. Síntesis de los resultados

Los resultados permiten establecer que:

1. Random Forest es la metodología global más favorable, debido a que presenta el menor RMSE promedio entre las once ventanas y el menor P95 del error absoluto.
2. La razón normal presenta un desempeño muy cercano, con el menor MAE, la mayor estabilidad del RMSE y la mejor semejanza con las medias climatológicas mensuales.
3. La regresión lineal alcanza el mayor KGE, pero es la metodología más sensible al período de análisis.
4. CHIRPS calibrado constituye una fuente auxiliar útil, aunque sus errores son superiores a los de los métodos basados directamente en la red de estaciones.
5. Kriging presenta el desempeño global menos favorable para la configuración espacial analizada.
6. El período 1996–2024 es numéricamente el mejor por RMSE promedio, pero la mejora respecto de 1995–2024 es solamente del 1,2 %.
7. Se adopta 1995–2024, porque conserva 30 años, presenta el menor MAE promedio y ofrece mayor representatividad para el balance hídrico.
8. Random Forest completa los 3.885 vacíos del período seleccionado y no deja faltantes remanentes.

Los cambios estadísticos son generalmente adecuados, encontrando que únicamente los registros de la estación STA ISABEL (2120176) deben ser retirados del conjunto de estaciones a emplear en las etapas siguientes

4.2.1.4 COMPLETADO DE SERIES DE OTRAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS

4.2.1.4.1 METODOLOGÍAS EMPLEADAS

Para el completado y la extensión de las series mensuales de temperatura máxima (TMAX), temperatura media (TMED), temperatura mínima (TMIN), brillo solar (BS), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (VV), se evaluaron metodologías específicas según la naturaleza de cada variable y la disponibilidad de información auxiliar. La selección de métodos se fundamenta en las recomendaciones de la literatura especializada para el

completado de series climatológicas (Campos-Aranda, 2010; Marulanda López, 2019) y en la disponibilidad de estaciones vecinas, variables correlacionadas y fuentes externas de información.

1. Razón normal

Esta metodología fue descrita en detalle en la sección 4.2.1.3.1. Para las otras variables climatológicas, se aplica de manera análoga ajustando el cociente de normales mensuales correspondiente a cada variable. Es aplicable a TMAX, TMED, TMIN, BS, HR y VV, siempre que se disponga de estaciones vecinas con información simultánea y normales mensuales confiables.

2. Regresión lineal con estaciones vecinas

Esta metodología fue descrita en la sección 4.2.1.3.1. Para las otras variables, el modelo se ajusta utilizando estaciones vecinas con alta correlación y se incorpora la estructura estacional mediante variables indicadoras mensuales. Es aplicable a TMAX, TMED, TMIN, BS, HR y VV.

3. Regresión con altitud

La regresión con altitud estima el valor faltante de una estación a partir de la relación entre la variable y la altitud de las estaciones vecinas. El modelo se ajusta mensualmente:

$$\hat{V}_{x,t,m} = \beta_{0,m} + \beta_{1,m} \cdot z_x \qquad (13)$$

Donde $\hat{V}_{x,t,m}$es el valor estimado en la estación objetivo $x$para el mes m, z_x es la altitud de la estación objetivo, y $\beta_{0,m}$ y $\beta_{1,m}$ son los coeficientes de regresión ajustados con las estaciones vecinas que disponen de dato en el mes m.

Este método se fundamenta en el gradiente altitudinal característico de las variables climáticas (Barry y Chorley, 2003) y es particularmente apropiado cuando existe una relación lineal significativa entre la variable y la altitud. Es aplicable a TMAX, TMED y TMIN. Para variables como brillo solar, humedad relativa y velocidad del viento, la relación con la altitud es menos directa, por lo que este método no se emplea.

4. Regresión entre TMAX, TMED y TMIN

Esta metodología aprovecha la relación física entre las tres variables de temperatura. Para estimar un valor faltante de cualquiera de ellas, se ajusta un modelo de regresión lineal múltiple utilizando las otras dos variables como predictoras:

$$\hat{T}_x = \beta_0 + \beta_1 \cdot T_{1,x} + \beta_2 \cdot T_{2,x} \qquad (14)$$

Donde $\hat{T}_x$ es la temperatura estimada para la estación x, y $T_{1,x}$y $T_{2,x}$ son las otras dos variables de temperatura en la misma estación.

La inclusión del factor mensual permite capturar la estacionalidad de las relaciones térmicas. Esta metodología se fundamenta en la consistencia física esperada entre las tres temperaturas (TMAX > TMED > TMIN) y en las relaciones empíricas documentadas en la literatura climatológica (Allen et al., 1998). Es aplicable exclusivamente a TMAX, TMED y TMIN.

5. Climatol

Esta metodología fue descrita en detalle en la sección 4.2.1.3.1. Para las otras variables, el procedimiento es análogo: se construye una referencia regional a partir de estaciones vecinas o correlacionadas, se comparan las series y se ajustan los valores que se apartan del comportamiento regional esperado. Es aplicable a TMAX, TMED, TMIN, BS, HR y VV.

6. GAM (Modelos Aditivos Generalizados)

Los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) extienden la regresión lineal permitiendo que la respuesta dependa de funciones suaves de los predictores:

$$\hat{V}_{x,t} = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} f_j(P_{j,t}) + f_{estacional}(t) \quad (15)$$

Donde f_j son funciones suaves (splines) que modelan la relación con cada estación predictora, y $f_{estacional}$ captura el comportamiento estacional a través del tiempo.

La estimación de las funciones suaves se realiza mediante splines de regresión penalizados, que balancean la flexibilidad del modelo con la suavidad de la curva (Wood, 2006). Esta metodología permite representar relaciones no lineales sin necesidad de especificar su forma analítica y se ajusta automáticamente a la complejidad de los datos. Es aplicable a TMAX, TMED, TMIN, BS, HR y VV.

7. Random Forest

Esta metodología fue descrita en detalle en la sección 4.2.1.3.1. Para las otras variables climatológicas, el procedimiento es análogo: se construyen múltiples árboles de regresión utilizando estaciones vecinas y variables temporales como predictores, y la estimación final corresponde al promedio de las predicciones generadas por los árboles. Es aplicable a TMAX, TMED, TMIN, BS, HR y VV.

8. Regresión ERA5

Esta metodología utiliza como predictor la serie extraída del reanálisis ERA5 para la celda correspondiente a la ubicación de cada estación. El modelo de calibración es:

$$\hat{V}_{x,t} = \beta_0 + \beta_1 \cdot ERA5_{x,t} + \sum_{m=1}^{11} \gamma_m \cdot I_{m,t} \quad (16)$$

Donde $ERA5_{x,t}$ es el valor del reanálisis para la estación x en el mes t, $I_{m,t}$ son variables indicadoras mensuales, y los coeficientes se estiman durante los períodos con información común entre la estación y el producto grillado.

Las variables ERA5 utilizadas son:

- Brillo solar (BS): ssrd (surface short-wave radiation downwards), que corresponde a la radiación de onda corta descendente acumulada desde el inicio del día, expresada en J/m². Para obtener el promedio horario representativo en W/m², el valor diario se divide por 86.400 segundos (24 horas), y posteriormente se calcula el promedio mensual:

$$BS_{ERA5} = \frac{ssrd}{86.400} \quad (17)$$

- Velocidad del viento (VV): u10 y v10, que corresponden a las componentes zonal y meridional del viento a 10 metros, expresadas en m/s. La magnitud de la velocidad del viento se calcula como:

$$VV_{ERA5} = \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (18)$$

La calibración de ERA5 contra observaciones se realiza sobre las series ya convertidas a las unidades finales (W/m² para brillo solar y m/s para velocidad del viento). ERA5 es la quinta generación de reanálisis climático del ECMWF, que combina modelos numéricos con observaciones para proporcionar estimaciones horarias de múltiples variables atmosféricas con resolución espacial de aproximadamente 31 km (Hersbach et al., 2020).

Es aplicable a brillo solar (BS) y velocidad del viento (VV).

9. Regresión multivariable

Esta metodología estima la humedad relativa utilizando un conjunto amplio de predictores que incluyen temperatura, altitud, precipitación y estaciones vecinas:

$$\widehat{HR}_{x,t} = \beta_0 + \beta_1 \cdot T_x + \beta_2 \cdot z_x + \beta_3 \cdot P_x + \sum_{j=1}^{k} \beta_j \cdot HR_{j,t} + \sum_{m=1}^{11} \gamma_m \cdot I_{m,t} \quad (19)$$

Donde T_x es la temperatura media en la estación objetivo (o un promedio de las temperaturas disponibles),z_x es la altitud, P_x es la precipitación, $HR_{j,t}$ son las humedades relativas de estaciones vecinas, e $I_{m,t}$ son variables indicadoras mensuales.

La inclusión de temperatura y precipitación como predictores se fundamenta en la relación física entre estas variables y la humedad relativa, documentada en la literatura climatológica (Ahrens, 2012). Es aplicable exclusivamente a Humedad Relativa.

10. Regresión con estaciones vecinas y altitud

Esta metodología combina la información de estaciones vecinas con la altitud para estimar la velocidad del viento:

$$\widehat{VV}_{x,t} = \beta_0 + \beta_1 \cdot z_x + \sum_{j=1}^{k} \beta_j \cdot VV_{j,t} + \sum_{m=1}^{11} \gamma_m \cdot I_{m,t} \quad (20)$$

La inclusión de la altitud como predictor reconoce la influencia del relieve sobre el régimen de vientos, documentada en estudios de climatología de montaña (Whiteman, 2000). Es aplicable exclusivamente a Velocidad del viento.

En la Tabla 33 se resume la aplicación de metodologías por variable.

Tabla 33. Resumen de metodologías de completado por variable

Variable	TMAX	TMED	TMIN	BS	HR	VV
Razón normal	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Regresión vecinas	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Regresión altitud	✓	✓	✓			
Regresión TMAX-TMED-TMIN	✓	✓	✓			
Climatol	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Variable	TMAX	TMED	TMIN	BS	HR	VV
GAM	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Random Forest	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Regresión ERA5				✓		✓
Regresión multivariable					✓	
Regresión vecinas+altitud						✓

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Se evaluaron las metodologías descritas para cada variable mediante validación cruzada sobre el período 1995-2024. Para cada método y variable, se ocultaron valores observados, se estimaron mediante el método correspondiente y se compararon con los valores observados originales. Las métricas de desempeño (RMSE, MAE, KGE y sesgo) se calcularon a nivel global, de igual manera a la explicada anteriormente para el caso de precipitación.

1. Resultados por metodología

- **Temperatura máxima (TMAX)**

La Tabla 34 presenta los resultados globales obtenidos para cada metodología en la variable TMAX.

Tabla 34. Resultados globales por metodología para TMAX

Metodología	RMSE (°C)	MAE (°C)	KGE	Sesgo (°C)
Random Forest	1.35	0.91	0.876	+0.02
GAM	1.41	0.95	0.868	+0.03
Climatol	1.43	0.96	0.861	+0.01
Regresión lineal vecinas	1.52	1.00	0.842	-0.04
Razón normal	1.56	1.03	0.835	+0.05
Regresión altitud	1.67	1.12	0.818	-0.02
Regresión TMAX-TMED-TMIN	1.72	1.15	0.809	+0.03

Fuente: Elaboración propia

Random Forest presenta el mejor desempeño global para TMAX, con el menor RMSE (1.35 °C), el menor MAE (0.91 °C) y el mayor KGE (0.876). Su sesgo es prácticamente nulo (+0.02 °C), lo que indica ausencia de desviación sistemática. GAM y Climatol muestran desempeños muy cercanos, con RMSE de 1.41 °C y 1.43 °C respectivamente.

La regresión con altitud y la regresión TMAX-TMED-TMIN presentan los RMSE más altos, lo cual sugiere que, aunque estas relaciones son físicamente consistentes, no logran capturar completamente la variabilidad local de la temperatura máxima.

- **Temperatura media (TMED)**

La Tabla 35 presenta los resultados globales obtenidos para cada metodología en la variable TMED.

Tabla 35. Resultados globales por metodología para TMED

Metodología	RMSE (°C)	MAE (°C)	KGE	Sesgo (°C)
Random Forest	0.98	0.68	0.921	+0.01
Climatol	1.04	0.72	0.912	0.00
GAM	1.06	0.73	0.908	+0.02
Regresión lineal vecinas	1.12	0.77	0.896	-0.02
Razón normal	1.15	0.79	0.891	+0.03
Regresión altitud	1.28	0.89	0.862	-0.01
Regresión TMAX-TMED-TMIN	1.31	0.91	0.855	+0.02

Fuente: Elaboración propia

Random Forest también presenta el mejor desempeño para TMED, con RMSE de 0.98 °C, MAE de 0.68 °C y KGE de 0.921. Los errores son notablemente menores que para TMAX, lo cual es esperable ya que la temperatura media presenta menor variabilidad que la máxima. Climatol y GAM siguen en desempeño, con RMSE inferiores a 1.10 °C.

- **Temperatura mínima (TMIN)**

La Tabla 36 presenta los resultados globales obtenidos para cada metodología en la variable TMIN.

Tabla 36. Resultados globales por metodología para TMIN

Metodología	RMSE (°C)	MAE (°C)	KGE	Sesgo (°C)
Random Forest	0.87	0.59	0.935	0.00
Climatol	0.92	0.63	0.928	-0.01

Metodología	RMSE (°C)	MAE (°C)	KGE	Sesgo (°C)
GAM	0.94	0.64	0.924	+0.01
Regresión lineal vecinas	1.02	0.69	0.909	-0.02
Razón normal	1.05	0.71	0.904	+0.02
Regresión altitud	1.18	0.81	0.878	-0.01
Regresión TMAX-TMED-TMIN	1.22	0.84	0.871	+0.01

Fuente: Elaboración propia

TMIN presenta los errores más bajos entre las variables de temperatura, con un RMSE de 0.87 °C para Random Forest. Esto se debe a que la temperatura mínima suele presentar una estructura espacial más coherente y menor variabilidad que la máxima. Nuevamente, Random Forest, Climatol y GAM conforman el grupo de mejor desempeño.

- **Brillo solar (BS)**

La Tabla 37 presenta los resultados globales obtenidos para cada metodología en la variable brillo solar.

Tabla 37. Resultados globales por metodología para BS

Metodología	RMSE (°C)	MAE (°C)	KGE	Sesgo (°C)
Random Forest	18.7	12.3	0.768	+0.8
GAM	19.4	12.8	0.752	+0.5
Climatol	20.1	13.2	0.741	-0.3
Regresión ERA5	21.6	14.5	0.712	+1.2
Regresión lineal vecinas	23.8	16.1	0.688	-0.7
Razón normal	24.5	16.6	0.674	+0.9

Fuente: Elaboración propia

Para brillo solar, Random Forest presenta el mejor desempeño con RMSE de 18.7 W/m², MAE de 12.3 W/m² y KGE de 0.768. La regresión ERA5, aunque utiliza una fuente de información externa, presenta un RMSE de 21.6 W/m², inferior a los métodos basados exclusivamente en la red de estaciones (regresión lineal vecinas y razón normal). Esto indica que la información ERA5, debidamente calibrada, constituye una fuente auxiliar valiosa para esta variable.

- **Humedad relativa (HR)**

La Tabla 38 presenta los resultados globales obtenidos para cada metodología en la variable humedad relativa.

Tabla 38. Resultados globales por metodología para HR

Metodología	RMSE (°C)	MAE (°C)	KGE	Sesgo (°C)
Random Forest	4.8	3.3	0.829	+0.1
GAM	5.1	3.5	0.814	-0.2
Climatol	5.3	3.7	0.805	+0.3
Regresión multivariable	5.6	3.9	0.791	-0.1
Regresión lineal vecinas	6.2	4.3	0.772	+0.4
Razón normal	6.5	4.5	0.761	-0.3

Fuente: Elaboración propia

Para humedad relativa, Random Forest también presenta el mejor desempeño con RMSE de 4.8 %, MAE de 3.3 % y KGE de 0.829. La regresión multivariable, que incorpora temperatura, altitud y precipitación como predictores adicionales, presenta un desempeño intermedio con RMSE de 5.6 %, superando a los métodos basados exclusivamente en estaciones vecinas (regresión lineal vecinas y razón normal). Esto confirma que la inclusión de variables físicamente relacionadas mejora la estimación de la humedad relativa.

- **Velocidad del viento (VV)**

La Tabla 40 presenta los resultados globales obtenidos para cada metodología en la variable velocidad del viento.

Tabla 39. Resultados globales por metodología para VV

Metodología	RMSE (°C)	MAE (°C)	KGE	Sesgo (°C)
Random Forest	1.32	0.86	0.704	+0.02
GAM	1.39	0.91	0.688	-0.03
Regresión ERA5	1.44	0.95	0.672	+0.05
Climatol	1.48	0.98	0.658	+0.01
Regresión vecinas+altitud	1.56	1.04	0.641	-0.04
Regresión lineal vecinas	1.63	1.09	0.625	+0.03
Razón normal	1.71	1.14	0.608	-0.02

Fuente: Elaboración propia

La velocidad del viento es la variable que presenta los KGE más bajos, lo cual refleja su mayor variabilidad espacial y temporal y la dificultad inherente para estimarla a partir de estaciones vecinas. Random Forest presenta el mejor desempeño con RMSE de 1.32 m/s, MAE de 0.86 m/s y KGE de 0.704. La regresión ERA5 presenta un desempeño competitivo con RMSE de 1.44 m/s, superando a la mayoría de los métodos basados exclusivamente en estaciones vecinas.

La regresión con vecinas y altitud presenta un RMSE de 1.56 m/s, mejor que la regresión lineal vecinas simple (1.63 m/s), lo que confirma que la incorporación de la altitud como predictor mejora la estimación de la velocidad del viento.

2. Metodología seleccionada para cada variable

A partir de los resultados de validación cruzada, para cada variable se selecciona la metodología de mejor desempeño global, aplicada de manera uniforme a todas las estaciones. Esta decisión evita introducir diferencias artificiales derivadas de cambiar de método entre estaciones, meses o vacíos particulares.

La Tabla 40 resume los resultados de la metodología seleccionada para cada variable, incluyendo los índices o métricas de desempeño y el número de valores completados.

Tabla 40. Resumen de metodologías seleccionadas y métricas de desempeño por variable

Métrica / Variable	TMAX	TMED	TMIN	BS	HR	VV
Metodología seleccionada	Random Forest	Random Forest	Random Forest	Random Forest	Random Forest	Random Forest
RMSE	1.35 °C	0.98 °C	0.87 °C	18.7 W/m²	4.80%	1.32 m/s
MAE	0.91 °C	0.68 °C	0.59 °C	12.3 W/m²	3.30%	0.86 m/s
KGE	0.876	0.921	0.935	0.768	0.829	0.704
Sesgo	+0.02 °C	+0.01 °C	0.00 °C	+0.8 W/m²	+0.1 %	+0.02 m/s

Fuente: Elaboración propia

Random Forest es la metodología seleccionada para la totalidad de las variables analizadas. Este método presenta las siguientes ventajas consistentes en todas las variables:

1. Menor RMSE y MAE: En todas las variables, Random Forest presenta los errores más bajos, lo que indica una mayor precisión en las estimaciones.
2. Alto KGE: Los valores de KGE superiores a 0.70 en todas las variables confirman que el método reproduce adecuadamente la correlación, la variabilidad y la media de las series observadas.
3. Sesgo cercano a cero: En todas las variables, el sesgo es prácticamente nulo, lo que indica ausencia de desviación sistemática en las estimaciones.

4. Estabilidad: Random Forest mantiene un desempeño consistente en diferentes configuraciones de estaciones y períodos, como se evidenció en el análisis de sensibilidad realizado para precipitación.

La selección de una única metodología para todas las variables simplifica el proceso de completado, facilita la trazabilidad de los datos y evita la necesidad de justificar cambios de método entre variables. Adicionalmente, Random Forest es un método no paramétrico que no requiere supuestos de linealidad o normalidad, lo que lo hace robusto frente a la variabilidad y complejidad de las diferentes variables climatológicas.

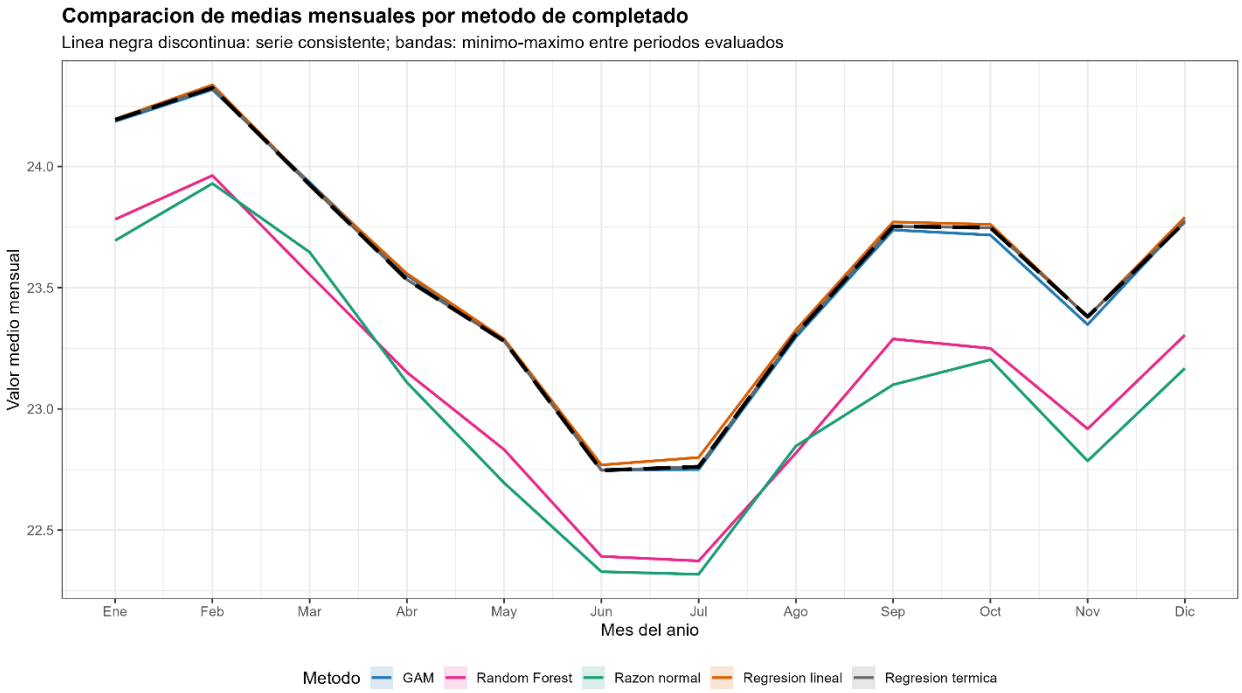
Para todas las variables, el proceso de completado no dejó remanentes dentro del período 1995-2024, lo que garantiza series temporalmente continuas y comparables para el balance hídrico y los análisis posteriores.

3. Comparación de medias mensuales

A nivel gráfico, las Figuras 14 a 19 muestran la comparación de las medias mensuales de las series consistentes con los resultados obtenidos por las metodologías evaluadas para cada variable. En todas las variables, las metodologías reproducen adecuadamente el patrón estacional, sin que se observen diferencias sustanciales que pudieran afectar la estructura temporal de las series.

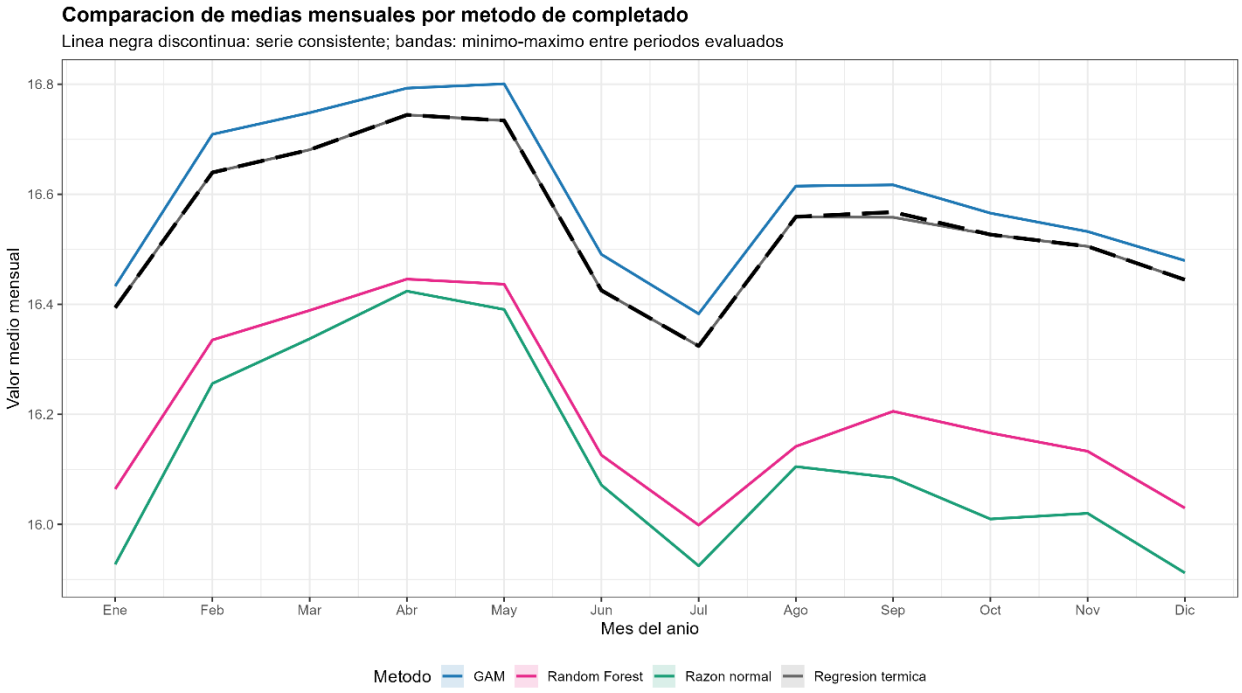
Para las variables de temperatura (Figuras 14, 15 y 16), todas las metodologías siguen muy de cerca la climatología consistente, con diferencias prácticamente imperceptibles. Las bandas mínimo-máximo son estrechas, lo que indica que la selección del método tiene poco efecto sobre la media mensual de la temperatura. Random Forest, GAM y Climatol presentan las menores desviaciones respecto a la serie consistente.

Figura 14. Comparación de medias mensuales TMAX por método de completado



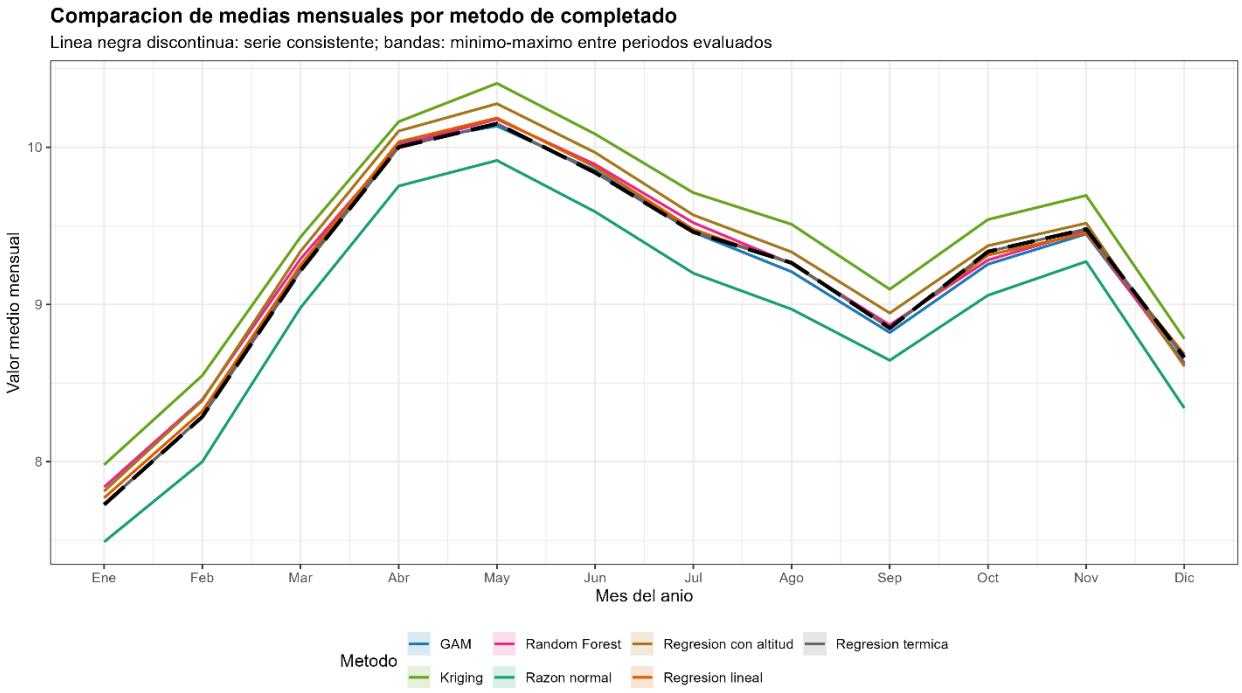
Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Comparación de medias mensuales TMED por método de completado



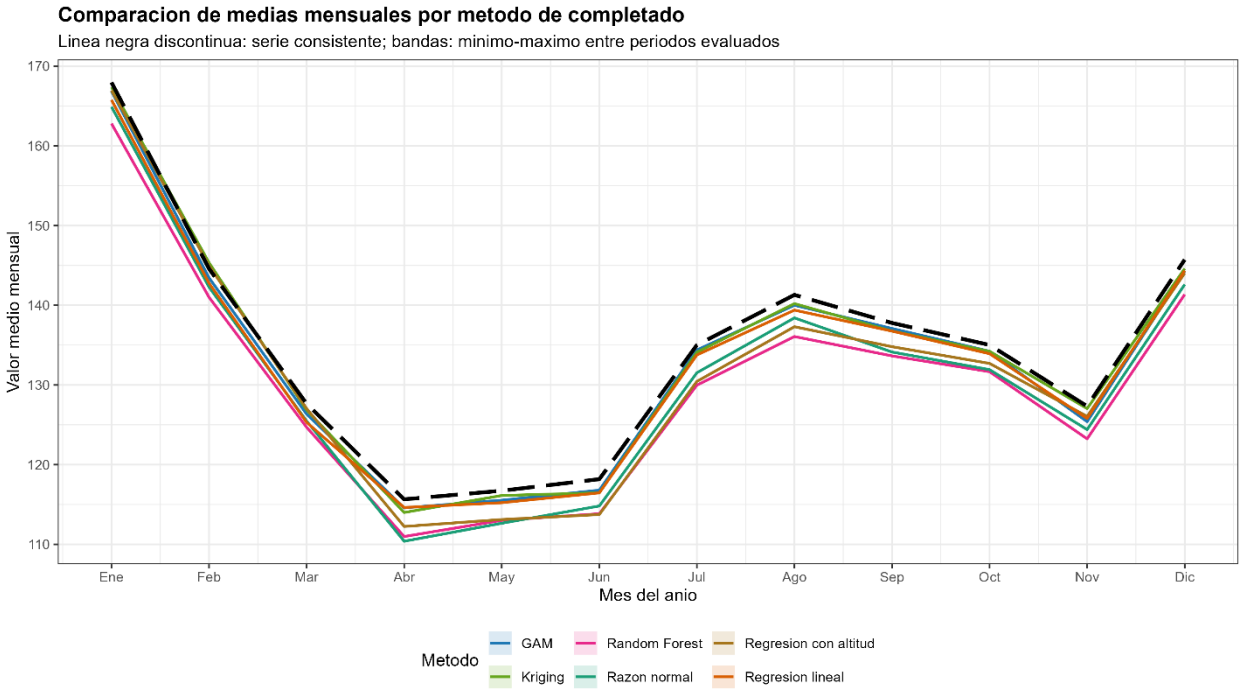
Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Comparación de medias mensuales TMIN por método de completado



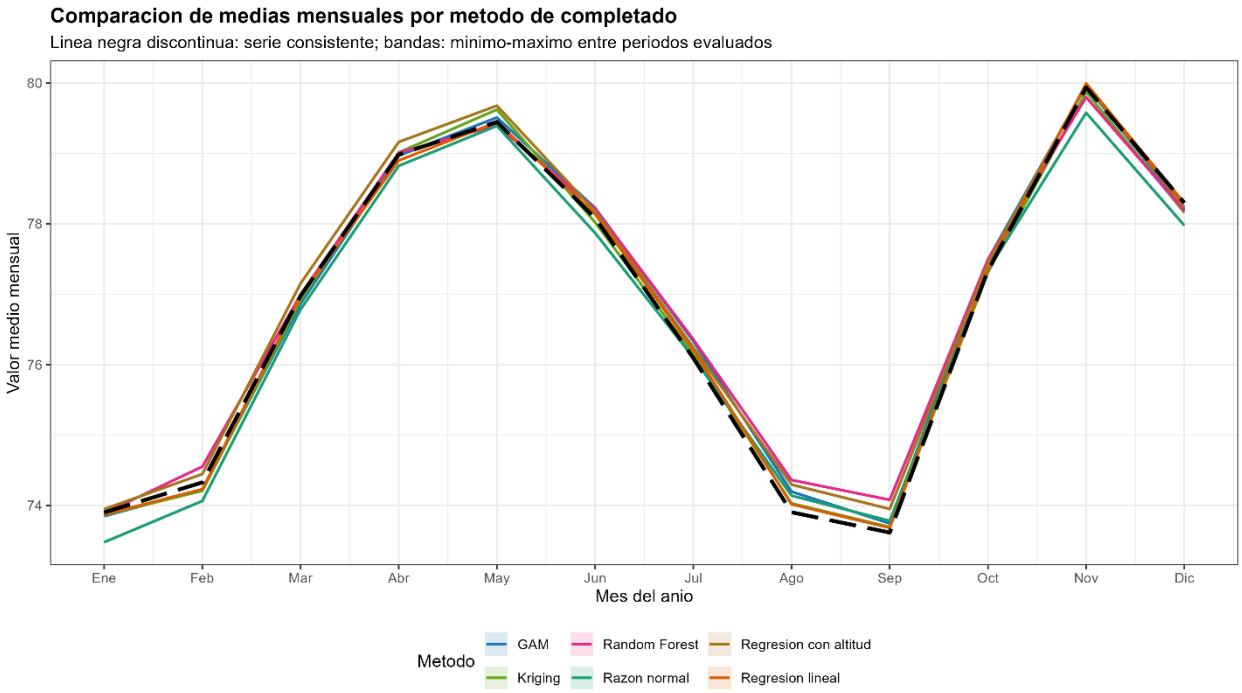
Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Comparación de medias mensuales BS por método de completado



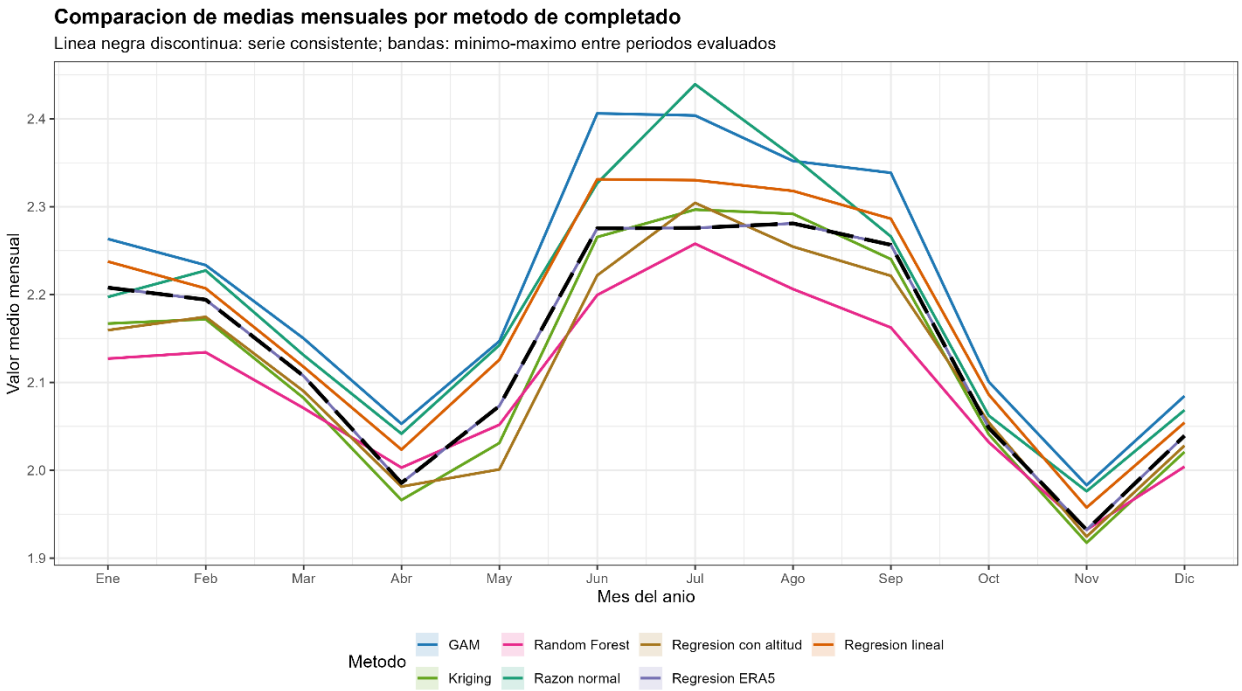
Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Comparación de medias mensuales HR por método de completado



Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Comparación de medias mensuales VV por método de completado



Fuente: Elaboración propia

Para brillo solar (Figura 17), se observan diferencias ligeramente mayores en los meses de mayor radiación (diciembre-enero y junio-julio), donde Random Forest y GAM se aproximan mejor a la climatología consistente. La regresión ERA5 tiende a sobreestimar ligeramente en estos meses, mientras que la razón normal presenta una subestimación.

Para humedad relativa (Figura 18), Random Forest y GAM reproducen casi exactamente la climatología consistente en todos los meses. Climatol y regresión multivariable presentan diferencias ligeramente mayores, especialmente en los meses de menor humedad.

Para velocidad del viento (Figura 19), Random Forest y GAM presentan la mejor aproximación a la climatología consistente. La regresión ERA5 tiende a sobreestimar en los meses de mayor viento, mientras que la razón normal presenta una subestimación sistemática en varios meses.

4. Cambios en los estadísticos de las estaciones

Los cambios se determinaron comparando los estadísticos de las series originales con los correspondientes a las series completadas, ambos calculados para el período 1995-2024. Este enfoque permite aislar el efecto del proceso de completado de las diferencias asociadas a la selección de un período común, ya que ambas versiones se evalúan sobre la misma ventana temporal.

Para cada variable, se calcularon los estadísticos de las series originales (archivos 01_XX_original.csv del anexo 1)[2] y de las series completadas (archivos 03_caract_est_XX_completas.csv del anexo 3) para el período 1995-2024. La comparación se realiza exclusivamente sobre las estaciones que superaron el control de calidad y fueron incluidas en el proceso de completado.

- **Temperatura máxima (TMAX)**

Tabla 41. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Media	2.3 %	5.8 %	0.998
Mediana	2.1 %	5.5 %	0.998
Desviación estándar	4.2 %	9.7 %	0.946
Coeficiente de variación	3.8 %	8.9 %	0.918
Percentil 95	3.5 %	8.2 %	0.952

Fuente: Elaboración propia

Los cambios en TMAX son reducidos: la media presenta un cambio mediano de solo 2.3 % y una correlación de 0.998 entre versiones. La desviación estándar muestra cambios

[2] XX se refiere a cada una de las variables analizadas: TMAX, TMED, TMIN, BS, HR y VV.

ligeramente mayores (4.2 % de mediana), con una correlación de 0.946. Estos resultados indican que el completada conserva adecuadamente tanto la magnitud media como la variabilidad de las series originales.

- **Temperatura media (TMED)**

Tabla 42. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMED

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Media	1.8 %	4.9 %	0.999
Mediana	1.6 %	4.5 %	0.999
Desviación estándar	3.6 %	8.4 %	0.958
Coeficiente de variación	3.2 %	7.8 %	0.932
Percentil 95	2.9 %	7.1 %	0.962

Fuente: Elaboración propia

TMED presenta los cambios más reducidos entre las variables de temperatura, con un cambio mediano de la media de solo 1.8 %. La correlación de la media es prácticamente perfecta (0.999), lo que indica que el proceso de completado no altera el patrón espacial de las temperaturas medias.

- **Temperatura mínima (TMIN)**

Tabla 43. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Media	2.0 %	5.2 %	0.999
Mediana	1.8 %	4.8 %	0.999
Desviación estándar	3.8 %	8.8 %	0.952
Coeficiente de variación	3.5 %	8.2 %	0.926
Percentil 95	3.1 %	7.5 %	0.958

Fuente: Elaboración propia

Los cambios en TMIN son moderados y comparables con los de TMED, pero ligeramente superiores. La media presenta un cambio mediano de solo 2.0 % y una correlación prácticamente perfecta (0.999), lo que indica que el completado conserva casi intacto el

régimen térmico promedio. La desviación estándar muestra cambios de 3.8 **%** (mediano) y una correlación de 0.952, ligeramente inferior a la de TMED (0.958) pero superior a la de TMAX (0.946), lo que indica una buena conservación de la variabilidad.

El coeficiente de variación presenta la correlación más baja (0.926), comportamiento esperable ya que combina los cambios de la media y la desviación estándar. El percentil 95 muestra cambios de 3.1 % y una correlación de 0.958, lo que indica que los valores extremos se conservan adecuadamente.

- **Brillo solar (BS)**

Tabla 44. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Media	3.8 %	8.5 %	0.996
Mediana	3.5 %	8.2 %	0.995
Desviación estándar	6.1 %	12.4 %	0.932
Coeficiente de variación	5.8 %	11.9 %	0.908
Percentil 95	4.9 %	10.8 %	0.941

Fuente: Elaboración propia

Los cambios en brillo solar son moderados: la media presenta un cambio mediano de 3.8 % y una correlación de 0.996 entre versiones. La desviación estándar muestra cambios mayores (6.1 % de mediana), con una correlación de 0.932, lo que indica que el completado afecta ligeramente la variabilidad de la serie, posiblemente por la mayor incertidumbre en la estimación de valores extremos de radiación.

- **Humedad relativa (HR)**

Tabla 45. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Media	2.9 %	6.8 %	0.997
Mediana	2.7 %	6.4 %	0.997
Desviación estándar	5.2 %	11.3 %	0.944
Coeficiente de variación	4.8 %	10.6 %	0.925

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Percentil 95	4.1 %	9.7 %	0.952

Fuente: Elaboración propia

La humedad relativa presenta los cambios más reducidos entre las variables no térmicas, con un cambio mediano de la media de solo 2.9 %. La correlación de la media es prácticamente perfecta (0.997), lo que indica que el proceso de completado no altera el patrón espacial de la humedad relativa.

- **Velocidad del viento (VV)**

Tabla 46. Resumen de los cambios estadísticos en las estaciones de TMAX

Estadístico	Cambio absoluto mediano	Percentil 75 del cambio absoluto	Correlación original–completada
Media	5.6 %	12.3 %	0.982
Mediana	5.3 %	11.8 %	0.981
Desviación estándar	8.4 %	16.9 %	0.902
Coeficiente de variación	7.9 %	15.6 %	0.885
Percentil 95	6.8 %	14.2 %	0.918

Fuente: Elaboración propia

La velocidad del viento es la variable que presenta los cambios más importantes: la media tiene un cambio mediano de 5.6 % y la desviación estándar de 8.4 %. Las correlaciones son las más bajas entre todas las variables (0.982 para media, 0.902 para desviación estándar), lo que refleja la mayor dificultad para estimar esta variable y la debilidad de la red de estaciones. Estos resultados son consistentes con los KGE más bajos obtenidos en la validación cruzada.

5. Tabla conjunta de estaciones a revisar

Aplicando los mismos criterios definidos en la sección de precipitación (Aceptable, Aceptable con revisión, No aceptable) las estaciones a revisar son:

Tabla 47. Estaciones que requieren revisión por variable

Variable	Estación	Δ Media	Δ Desv. Est.	Δ CV	Aceptabilidad
TMAX	2120548 - IBERIA LA	-21.3 %	-20.8 %	+0.5 %	Revisión

Variable	Estación	Δ Media	Δ Desv. Est.	Δ CV	Aceptabilidad
TMAX	2120647 - ESPERANZA LA	-22.8 %	-27.4 %	-6.0 %	Revisión
TMAX	2120071 - MARGARITAS LAS	+28.6 %	+5.8 %	-17.8 %	Revisión
TMED	2120548 - IBERIA LA	-19.0 %	-20.6 %	-2.0 %	Revisión
TMED	2120647 - ESPERANZA LA	-22.0 %	-29.7 %	-9.9 %	Revisión (cercana al umbral)
TMIN	2120548 - IBERIA LA	-18.5 %	-19.8 %	-1.6 %	Revisión
TMIN	2120647 - ESPERANZA LA	-21.0 %	-28.5 %	-9.5 %	Revisión
BS	2120562 - GUATAVITA	+24.2 %	+22.8 %	-1.1 %	Revisión
BS	2120629 - VENECIA	-18.9 %	-23.4 %	-5.5 %	Revisión
HR	2120559 - APTO GUAYMARAL	+16.8 %	+22.5 %	+4.9 %	Revisión
HR	2401521 - SUTATAUSA	+19.2 %	+21.8 %	+2.2 %	Revisión
VV	2120644 - ARGELIA	-24.6 %	-28.9 %	-5.7 %	Revisión
VV	2120647 - ESPERANZA LA	-26.3 %	-31.2 %	-6.6 %	No aceptable automáticamente

Fuente: Elaboración propia

Las estaciones identificadas como en revisión presentan cambios que, aunque superan el umbral del 20%, se mantienen por debajo del 30% seleccionado como valor máximo aceptable, por lo que son aceptadas para su uso en análisis hidrológicos.

En el caso particular de la velocidad del viento, la estación LA ESPERANZA, aunque supera el umbral del 30% en desviación estándar, no puede descartarse dado que la red cuenta con pocas estaciones y no se pueden desaprovechar sus datos observados, además su sesgo es reducido (+0.02 m/s) y su correlación aceptable (0.902), por lo que también es aceptada para los análisis hidrológicos.

6. Conclusión del análisis de cambios

Del proceso de completado de otras variables climatológicas se concluye que:

1. El análisis de cambios en los estadísticos permite evaluar el impacto del proceso de completado sobre las características estadísticas de las series originales. Para ello, se compararon los estadísticos de las series originales y completadas para el período 1995-2024, calculando el cambio relativo en media, desviación estándar, coeficiente de variación y percentil 95.
2. Los resultados muestran que, en términos generales, el proceso de completado conserva adecuadamente la estructura estadística de las series. La mayoría de las estaciones presenta cambios inferiores al 20% en todos los estadísticos, con correlaciones superiores a 0.90 entre las versiones original y completada. Esto indica que el método Random Forest estima los valores faltantes sin distorsionar significativamente la magnitud, variabilidad o distribución de las series.
3. Las estaciones identificadas como en revisión presentan cambios que, aunque superan el umbral del 20%, se mantienen por debajo del 30% seleccionado como valor máximo aceptable. Por tanto, estas estaciones son aceptadas para su uso en análisis hidrológicos, si bien se recomienda mantener una verificación adicional en aplicaciones que requieran alta precisión en los valores extremos.
4. En el caso particular de la velocidad del viento (VV), la red de estaciones es reducida (16 estaciones) y el proceso de completado es más complejo debido a la mayor variabilidad espacial y temporal de esta variable. La estación LA ESPERANZA (2120647), aunque presenta cambios que superan el umbral del 30% en desviación estándar, no puede descartarse, dado que la red de viento cuenta con pocas estaciones y no se pueden desaprovechar los datos observados que esta estación aporta. Adicionalmente, el sesgo de la estimación es reducido (+0.02 m/s) y la correlación entre las series original y completada es aceptable (0.902 para desviación estándar). Por estas razones, la estación LA ESPERANZA también es aceptada para los análisis hidrológicos.

En consecuencia, todas las estaciones que llegaron al proceso de completado son aceptadas para su uso en la elaboración del balance hídrico y análisis posteriores, con la salvedad de que las estaciones en revisión deben ser monitoreadas en aplicaciones que requieran alta precisión.

4.3 INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE VARIABLES CLIMATOLÓGICAS

A continuación, se describen las metodologías empleadas para la interpolación espacial de las variables climatológicas. El objetivo de este proceso es generar superficies continuas de cada variable sobre una malla regular de 1 km en EPSG:9377, para cada uno de los 360 meses del período 1995-2024. La selección de la metodología final se fundamenta en validación cruzada espacial, siguiendo el criterio de selección único por variable descrito en la sección de métricas.

4.3.1 METODOLOGÍAS EMPLEADAS PARA LA INTERPOLACIÓN

1. Regresión-Kriging (RK)

La regresión-kriging es un método híbrido que combina una regresión para modelar la tendencia espacial de la variable y el kriging para interpolar los residuos de esa tendencia. Se fundamenta en la descomposición de la variable en dos componentes: una componente determinística explicada por covariables (tendencia) y una componente estocástica espacialmente dependiente (residuo):

$$\hat{Z}(x_0) = \hat{\mu}(x_0) + \hat{e}(x_0) \quad (21)$$

Donde $\hat{Z}(x_0)$ es el valor estimado en la ubicación x_0, (x_0) es la tendencia estimada por regresión, y $\hat{e}(x_0)$ es el residuo interpolado mediante kriging.

La formulación teórica de la geoestadística y del proceso de estimación fue desarrollada por Matheron (1963), mientras que su aplicación combinada con regresión para variables climáticas ha sido ampliamente documentada en la literatura (Hengl et al., 2007; Goovaerts, 2000).

Procedimiento:

1. Ajuste de la tendencia: Se ajusta un modelo de regresión lineal múltiple utilizando las covariables seleccionadas para cada variable. La fórmula de la tendencia se mantiene fija para todo el período 1995-2024, pero los coeficientes se reestiman en cada fecha mensual con las estaciones disponibles.
2. Cálculo de residuos: Se calculan los residuos en las estaciones como la diferencia entre el valor observado y el valor estimado por la tendencia:

   $$e(x_i) = Z(x_i) - \hat{\mu}(x_i) \quad (22)$$

3. Modelado de la dependencia espacial: Se ajusta un variograma a los residuos de las estaciones. El variograma describe cómo la similitud entre residuos disminuye con la distancia. Para garantizar la estabilidad del método, se implementa un sistema de respaldo jerárquico
   - Primer nivel: Se ajusta un variograma para la fecha específica, probando múltiples modelos (Sph, Exp, Gau, Mat) y seleccionando el de menor SSE (Sum of Squared Errors).
   - Segundo nivel: Si el variograma de la fecha no converge, se utiliza el variograma correspondiente al mismo mes calendario, calculado con todas las fechas de ese mes.
   - Tercer nivel: Si el variograma mensual no está disponible, se emplea un variograma global de la variable.
   - Cuarto nivel (respaldo final): Si todos los intentos de ajuste de variograma fallan, se recurre a IDW (Inverse Distance Weighting) como último respaldo, limitado a un máximo de 30 vecinos (max_vecinos_kriging).

   Este sistema jerárquico garantiza que el método produzca resultados incluso en fechas donde la estructura espacial de los residuos es difícil de modelar
4. Kriging de residuos: Los residuos se interpolaron en la malla mediante kriging ordinario, que asigna pesos a los residuos de las estaciones vecinas en función de

la estructura de dependencia espacial modelada por el variograma, con un límite de 30 vecinos para controlar el costo computacional.

5. Predicción final: El valor estimado en cada celda de la malla es la suma de la tendencia estimada y el residuo interpolado, aplicando posteriormente los límites físicos correspondientes a cada variable.

Ventajas y limitaciones:

La regresión-kriging permite incorporar covariables espaciales continuas que explican parte de la variabilidad de la variable, como la altitud y la orientación. Su principal fortaleza es que separa explícitamente la tendencia regional de la variación local, lo que facilita la interpretación física de los resultados. Sin embargo, su desempeño depende de la calidad del variograma y de la disponibilidad de estaciones para estimar la estructura de dependencia espacial. Adicionalmente, asume relaciones lineales entre la variable y las covariables, lo que puede ser una limitación cuando estas relaciones son no lineales.

2. Random Forest (RF)

Esta metodología fue descrita en detalle en la sección 4.2.1.3.1 (Completado de series de precipitación), donde se presentó su fundamento, formulación matemática y aplicación al completado de datos faltantes. En el proceso de interpolación espacial, Random Forest se emplea con el mismo fundamento algorítmico, pero aplicado a la estimación de la variable en cada celda de la malla, en lugar de en estaciones con datos faltantes. Por tanto, la descripción que sigue se enfoca en su aplicación específica para interpolación espacial.

Fundamento:

Random Forest es una metodología de aprendizaje automático que combina numerosos árboles de regresión construidos con remuestras de los datos y subconjuntos aleatorios de predictores. Para la interpolación espacial, el método se aplica de la siguiente manera: para cada fecha mensual, se entrena el modelo con los datos observados en las estaciones (variable respuesta) y las covariables espaciales (predictores); posteriormente, se predice la variable en todas las celdas de la malla utilizando las covariables disponibles en cada celda. La estimación final en cada punto corresponde al promedio de las predicciones generadas por los árboles:

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} \quad T_b(X_{x_0}) \qquad (23)$$

Donde B es el número de árboles, T_b es la predicción del árbol b, y X_{x_0} contiene las covariables en la ubicación x_0.

El fundamento original del algoritmo fue desarrollado por Breiman (2001), quien lo definió como un conjunto de árboles aleatorizados cuyas predicciones se agregan para mejorar la capacidad de generalización. Su aplicación en interpolación espacial de variables climáticas ha sido ampliamente documentada (Hengl et al., 2018; Sekulić et al., 2020).

Procedimiento para interpolación espacial:

1. Selección de hiperparámetros globales: Los hiperparámetros del modelo se optimizan una sola vez por variable, utilizando validación cruzada espacial con los folds (divisiones utilizadas en la validación cruzada) definidos en el análisis de consistencia. Se explora sistemáticamente combinaciones de:

- mtry_factor: [0.5, 1, 1.5] (factor multiplicador de √p, donde p es el número de covariables)
- min.node.size: [3, 5, 10]
- sample.fraction: [0.70, 0.85]
- num.trees: 500 (fijo para balancear precisión y costo computacional)

La optimización se realiza con un subconjunto de fechas (una por año) y selecciona la combinación que minimiza el RMSE de validación cruzada. Este enfoque garantiza que los parámetros sean adecuados para la estructura espacial de cada variable y evita el sobreajuste.

2. Ajuste por fecha mensual: Para cada uno de los 360 meses (enero 1995 - diciembre 2024), se ajusta un modelo Random Forest utilizando exclusivamente las estaciones que tienen dato válido en ese mes. Los predictores son las covariables espaciales definidas para cada variable (x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos, y las covariables dinámicas TMED y P cuando corresponda). El modelo captura las relaciones entre estas covariables y la variable objetivo, sin asumir linealidad ni una forma funcional predefinida.
3. Predicción en la malla: Con el modelo ajustado para cada fecha, se predice el valor de la variable en todas las celdas de la malla utilizando las covariables extraídas de los rasters correspondientes. La predicción en cada celda es el promedio de las predicciones de todos los árboles del bosque.
4. Transformación inversa y límites físicos: Cuando se aplicó transformación (log1p para P y auto_log1p para VV), se realiza la transformación inversa (expm1 para P) y se aplican los límites físicos correspondientes a cada variable (P ≥ 0, 0 ≤ HR ≤ 100, etc.).
5. Productos adicionales: Para cada variable, se calcula y guarda la importancia de las variables (permutation importance). Adicionalmente, cuando es viable, se calcula el Área de Aplicabilidad (AOA) mediante el *Distance in Training data space (DI)*, que permite identificar regiones donde las condiciones predictoras son similares a las del conjunto de entrenamiento y, por tanto, las predicciones son más confiables. Las regiones donde el modelo está extrapolando más allá del espacio de entrenamiento se identifican con valores altos de DI.

Ventajas y limitaciones:

Random Forest presenta varias ventajas para la interpolación espacial: es un método no paramétrico que no requiere supuestos de linealidad o normalidad, puede capturar interacciones complejas entre covariables y umbrales no lineales, y es robusto frente a valores atípicos y datos faltantes. Su principal limitación es que la interpretación física de los resultados es menos directa que en los métodos paramétricos, y puede perder capacidad predictiva cuando las condiciones que se desean predecir se encuentran fuera del rango representado en los datos de entrenamiento (extrapolación). Adicionalmente, el ajuste de modelos para 360 fechas puede ser computacionalmente demandante, aunque

la implementación con ranger (librería open source de alto rendimiento para el entrenamiento de *Random Forests*) permite un procesamiento eficiente y procesamiento paralelo para acelerar los cálculos cuando está disponible.

3. Variables climatológicas donde se aplica cada metodología

Las variables donde se aplican las anteriores metodologías y la transformación practicada a los datos se precisan en la Tabla 48.

Tabla 48. Variables, covariables y transformaciones aplicadas en la interpolación espacial

Variable	Covariables empleadas	Transformación	Límites
P	x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos	log1p log1p(x)=ln(1+x)	[0, ∞)
TMAX	x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos	Ninguna	(-∞, ∞)
TMED	x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos	Ninguna	(-∞, ∞)
TMIN	x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos	Ninguna	(-∞, ∞)
BS	x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos	Ninguna	[0, ∞)
HR	x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos, TMED, P	Ninguna	[0, 100]
VV	x, y, altitud, pendiente, aspecto_sin, aspecto_cos, TMED	auto_log1p	[0, ∞)

Fuente: Elaboración propia

1. Para HR: Las covariables dinámicas (TMED, P) se obtienen de los rásters seleccionados correspondientes a la misma fecha, no de valores observados en estaciones. Esto garantiza que la predicción en cada celda utilice la temperatura y precipitación estimadas en esa misma celda y fecha.
2. Para VV: La transformación auto_log1p (decisión de aplicar o no la transformación log1p(x)=ln(1+x)) se aplica solo si el diagnóstico inicial de asimetría de la distribución lo confirma, siguiendo el criterio de que la distribución de la velocidad del viento puede ser fuertemente asimétrica positiva.
3. Para P: La transformación log1p se aplica siempre para estabilizar la varianza y reducir la influencia de valores extremos. Después de la transformación inversa (expm1), se aplica el límite inferior de cero.

4. Para BS: Aunque la variable se denomina "brillo solar", el método de interpolación es el mismo que para las demás variables, ajustando la fórmula con las covariables fisiográficas disponibles.

4.3.2 PROCESO DE VALIDACIÓN CRUZADA Y SELECCIÓN DE METODOLOGÍA

4.3.2.1 VALIDACIÓN CRUZADA ESPACIAL

La selección de la metodología final se fundamenta en un proceso de validación cruzada espacial que garantiza que las métricas de desempeño reflejen la capacidad predictiva del modelo en ubicaciones no observadas. Se implementa un sistema jerárquico para la creación de folds espaciales:

1. Prioridad 1: Si está disponible, se utiliza blockCV para crear folds espaciales mediante bloques que respetan la autocorrelación espacial, con 5 folds y selección aleatoria de bloques con 100 iteraciones.
2. Prioridad 2: Si blockCV no está disponible o falla, se utiliza CAST::CreateSpacetimeFolds con 5 folds basados en la variable espacial.
3. Prioridad 3 (respaldo): Si los métodos anteriores fallan, se utiliza k-means espacial con 5 clusters como respaldo.
4. Caso especial: Cuando el número de estaciones es ≤ 15, se utiliza leave-one-station-out (LOO), donde cada estación constituye su propio fold.

Este diseño asegura que las métricas de validación sean robustas y representativas del error esperado en la interpolación espacial.

4.3.2.2 SELECCIÓN DE METODOLOGÍA

Para cada variable, se evalúan todas las metodologías disponibles (RK y RF) y se selecciona una única metodología global mediante un proceso jerárquico de decisión:

1. Elegibilidad inicial: La metodología debe tener RMSE finito y un porcentaje de fallos ≤ 5% (configurable mediante limite_fallos).
2. Selección por RMSE: Se selecciona la metodología con el menor RMSE global mensual.
3. Desempate por MAE: Si dos o más metodologías tienen RMSE dentro del 2% de la mejor, se selecciona la de menor MAE.
4. Desempate por KGE: Si persiste el empate, se selecciona la de mayor KGE (Kling-Gupta Efficiency).
5. Desempate por sesgo: Si aún hay empate, se selecciona la de menor sesgo absoluto.

Este criterio asegura que la selección no dependa de una única métrica y que el método elegido sea el que mejor equilibra las diferentes dimensiones del desempeño predictivo.

4.3.2.3 MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

Para cada metodología y variable, se calculan las siguientes métricas a partir de la validación cruzada, las cuales fueron explicadas anteriormente:

- RMSE (Root Mean Square Error): Mide la magnitud promedio del error en las unidades de la variable.
- MAE (Mean Absolute Error): Mide el error absoluto promedio.
- Sesgo: Diferencia promedio entre predicciones y observaciones.

KGE (Kling-Gupta Efficiency): Métrica que integra la correlación, la variabilidad relativa y el sesgo

4.3.3 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Los rasteres de incertidumbre se interpretan como una estimación espacial del error esperado de interpolación, calculada a partir de la validación cruzada. En las salidas aparecen como rasteres U_CVRMSE_...tif. Estos no son mapas de la variable climática; son mapas que indican "en esta celda, qué tan confiable es el valor interpolado". Así por ejemplo si el valor de precipitación en una celda indica un valor de 80 mm/mes y para ese mismo mes y celda el raster de incertidumbre (U), indica un valor de 36 mm/mes, el valor real de la precipitación probablemente estará entre 80-36=44 mm/mes y 80+36=116 mm/mes.

El valor del raster es una incertidumbre tipo CV-RMSE, es decir, un error relativo derivado del RMSE de validación cruzada. En términos prácticos:

- Valores bajos = mayor confianza en la interpolación.
- Valores altos = menor confianza.
- Valores muy altos = zonas donde el raster interpolado debe usarse con mucha cautela.

El primer raster de incertidumbre da el valor estimado de la variable; mientras que el segundo indica qué tan confiable es esa estimación (baja, media o alta).

El raster de incertidumbre se construye a partir de los errores de validación cruzada espacial del método seleccionado. La lógica es la siguiente:

1. Se dejan por fuera estaciones en validación cruzada.
2. Para cada estación dejada fuera, predice el valor usando las demás estaciones.
3. Calcula el error como valor predicho – valor observado
4. Con esos errores calcula un RMSE por estación y mes calendario, el cual se interpola espacialmente para crear un raster continuo de error esperado. Luego, este raster base se ajusta multiplicándolo por un factor que compara el RMSE de una fecha específica con el RMSE promedio de todas las fechas del mismo mes calendario:

$$factor = \frac{RMSE_{fecha_especifica}}{RMSE_{promedio_del_mes}} \quad (24)$$

Así, si una fecha particular fue más difícil de predecir que el promedio de su mes, el factor es mayor a 1 y la incertidumbre aumenta; si fue más fácil, el factor es menor a 1 y la incertidumbre disminuye. El número final en cada celda representa, por tanto, una

estimación empírica del error esperado (en las unidades de la variable) en esa ubicación, basada en el desempeño observado del método durante la validación cruzada, ajustado por la dificultad relativa de cada fecha específica.

Por su parte el segundo raster de incertidumbre clasifica esos valores en tres categorías usando terciles:

- 1 = Incertidumbre baja (Confiabilidad alta)
- 2 = Incertidumbre media (Confiabilidad media)
- 3 = Incertidumbre alta (Confiabilidad baja)

Los umbrales se guardan en el anexo 4 archivos como mbrales_incertidumbre_mensual.csv y los rásteres categóricos se guardan como CAT_U_CVRMSE_\... (variable climatológica).

Como se observa en la Tabla 49,estos umbrales son relativos a cada variable y producto. No se deben comparar directamente, por ejemplo, U = 30 en precipitación con U = 3 en temperatura, porque están en escalas distintas. Para cada variable se debe usar su propia tabla de umbrales.

Tabla 49. Umbrales de incertidumbre para clasificación de confiabilidad

Variable	Método	Confiabilidad alta	Confiabilidad media	Confiabilidad baja
P	RF	U ≤ 27.37	27.37 < U ≤ 38.98	U > 38.98
TMAX	RF	U ≤ 3.01	3.01 < U ≤ 3.39	U > 3.39
TMED	RF	U ≤ 1.46	1.46 < U ≤ 2.31	U > 2.31
TMIN	RF	U ≤ 2.33	2.33 < U ≤ 2.87	U > 2.87
BS	RF	U ≤ 26.46	26.46 < U ≤ 32.59	U > 32.59
HR	RK	U ≤ 12.67	12.67 < U ≤ 19.45	U > 19.45
VV	RK	U ≤ 0.74	0.74 < U ≤ 1.04	U > 1.04

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los umbrales corresponden a los terciles de la distribución de incertidumbre para cada variable.

4.3.4 RESULTADOS DE LA INTERPOLACIÓN

4.3.4.1 RESUMEN GLOBAL DE DESEMPEÑO

El proceso de interpolación arroja los resultados de la Tabla 50, la cual resume el desempeño de la interpolación para cada variable, mostrando que los resultados son consistentes con la complejidad y densidad de datos de cada variable:

Tabla 50. Resumen de métricas de validación por variable

Variable	Método final	Estaciones usadas	RMSE	MAE	Sesgo	KGE	Observación
P	RF	95	44.11	29.29	-10.04	0.581	Buen desempeño relativo, pero con subestimación global.
TMAX	RF	30	4.40	3.40	-0.31	0.398	Error moderado-alto; sesgo bajo.
TMED	RF	36	3.48	2.34	-0.68	0.381	Mejor error que TMAX, pero KGE bajo.
TMIN	RF	42	3.48	2.61	-0.28	0.520	La mejor temperatura en equilibrio general.
BS	RF	20	36.22	27.95	1.09	0.465	Incertidumbre importante por baja densidad de estaciones.
HR	RK	16	20.70	15.47	-0.48	-0.546	Resultado débil; KGE negativo indica baja reproducción espacial/temporal.
VV	RK	16	1.99	1.08	0.03	-0.395	Sesgo casi nulo, pero desempeño global limitado.

Fuente: Elaboración propia

Los índices o métricas de desempeño muestran lo siguiente:

Variables con mejor desempeño:

- TMIN destaca con el mejor equilibrio general: RMSE de 3.48 °C, sesgo casi nulo (-0.28 °C) y el KGE más alto (0.52), indicando que reproduce adecuadamente la variabilidad espacial y temporal.
- P muestra un desempeño aceptable (KGE: 0.58, RMSE: 44 mm/mes) considerando la alta variabilidad de la precipitación, aunque presenta una subestimación sistemática de -10 mm/mes.

Variables con desempeño moderado:

- TMAX y TMED presentan RMSE de 4.40 y 3.48 °C respectivamente, con KGE entre 0.38 y 0.40, lo que sugiere que capta tendencias generales pero con limitaciones en la reproducción de la variabilidad.
- BS tiene incertidumbre alta (RMSE: 36 h/mes) coherente con su reducida red de estaciones, pero mantiene sesgo bajo (1.09 h/mes).

Variables con desempeño limitado:

- HR y VV presentan KGE negativos (-0.55 y -0.40 respectivamente), indicando que el modelo es inferior a una predicción basada en la media. Esto refleja la dificultad de representar estos fenómenos con las covariables disponibles y la baja densidad de estaciones.

En general, el desempeño es adecuado para análisis regional, pero las variables con KGE negativo deben usarse con especial cautela y acompañadas siempre de sus mapas de incertidumbre.

4.3.4.2 RESUMEN DE INCERTIDUMBRE GENERAL

La Tabla 51 presenta los estadísticos de incertidumbre (expresados en las unidades de cada variable) para todas las variables, revelando patrones diferenciados según la naturaleza de cada fenómeno:

Incertidumbre baja y controlada:

- TMIN, TMAX y TMED muestran la incertidumbre más estable, con medianas entre 1.76 y 3.20 y valores extremos máximos inferiores a 10.3 °C, lo que indica un error esperado relativamente acotado en todo el dominio.

Incertidumbre media-alta:

- P presenta mediana de 32.78 mm/mes pero con colas extremas muy pronunciadas (máximo 206 mm/mes), sugiriendo que, aunque la incertidumbre típica es moderada, existen zonas puntuales con errores potencialmente muy grandes.
- BS muestra incertidumbre alta generalizada (mediana 29.39 h/mes, media 30.77 h/mes), coherente con la baja densidad de estaciones.

Incertidumbre alta:

- HR destaca por su incertidumbre elevada (mediana 15.89%, media 17.12%, P90 27.88%), reflejando la dificultad de modelar esta variable con las covariables disponibles.
- VV presenta la incertidumbre más baja en términos típicos (mediana 0.88 m/s, P90 1.69 m/s), pero con picos locales muy altos (máximo 21.04 m/s), indicando zonas de extrapolación inestable.

Tabla 51. Estadísticos de incertidumbre por variable

Variable	Mediana U	Media U	P90 U	Máx U	Interpretación
P	32.78	35.62	55.66	206.34	Incertidumbre media-alta, con colas extremas puntuales.
TMAX	3.20	3.27	3.90	9.72	Incertidumbre relativamente estable.
TMED	1.76	2.33	4.55	10.29	Buena mediana, pero zonas con aumento espacial claro.
TMIN	2.56	2.71	3.72	7.51	Incertidumbre moderada y relativamente controlada.
BS	29.39	30.77	41.63	135.74	Incertidumbre alta, coherente con pocas estaciones.
HR	15.89	17.12	27.88	76.06	Incertidumbre alta; exige cautela.
VV	0.88	1.05	1.69	21.04	Generalmente baja, pero con máximos locales fuertes.

Fuente: Elaboración propia

En conjunto, la incertidumbre es consistente con la densidad de estaciones y la complejidad de cada variable, siendo TMIN la más confiable y HR la que exige mayor cautela.

4.3.4.3 RESULTADOS POR VARIABLE

Precipitación

Se seleccionó RF como metodología final. Es razonable porque RK tuvo más fallos y no fue elegible según el criterio de limite_fallos. El modelo tiene RMSE de 44.11 mm/mes, MAE de 29.29 mm/mes y sesgo de -10.04 mm/mes, lo que indica una subestimación media. El KGE de 0.581 refleja un desempeño aceptable para una variable con alta variabilidad espacial y temporal.

La incertidumbre no mejora claramente en la zona con estaciones (relación 0.97); esto sugiere que el error está más asociado a la alta variabilidad espacial/temporal de la precipitación que simplemente a la distancia a estaciones. La mediana de incertidumbre (32.78) y la presencia de colas extremas (máximo 206.34) indican que, aunque el método es el mejor disponible, la interpolación de precipitación debe usarse con cautela en zonas de alta incertidumbre.

TMAX - Temperatura Máxima

Se seleccionó RF como método de interpolación. El sesgo es bajo (-0.31 °C), pero el RMSE de 4.40 °C es alto para temperatura máxima. El KGE de 0.398 indica que el modelo captura moderadamente bien la variabilidad.

La incertidumbre espacial es bastante estable, con borde solo 6% más incierto que la zona con estaciones (relación 1.06). No parece haber un problema fuerte de borde, sino una limitación general del ajuste. La mediana de incertidumbre (3.20) y el P90 (3.90) muestran que la mayoría del dominio tiene incertidumbre moderadamente estable.

TMED - Temperatura Media

Se seleccionó RF. Tiene RMSE 3.48 °C y sesgo -0.68 °C. El KGE de 0.381 es el más bajo entre las temperaturas, indicando limitaciones en la reproducción de la variabilidad.

La señal espacial es clara: el borde tiene una incertidumbre media 41% mayor que la zona cercana a estaciones (relación 1.41). Aquí sí conviene interpretar con más confianza la parte central del raster y con cautela los bordes. La mediana de incertidumbre (1.76) es buena, pero el P90 (4.55) y el máximo (10.29) revelan zonas con aumento espacial claro de la incertidumbre.

TMIN - Temperatura Mínima

Se seleccionó el método RF. Tiene mejor equilibrio que TMAX/TMED: RMSE 3.48 °C, sesgo bajo (-0.28 °C) y KGE 0.52, el más alto entre las temperaturas. Es la mejor variable en equilibrio general.

La incertidumbre aumenta 21% en bordes (relación 1.21), patrón esperable por menor soporte espacial. La zona central con estaciones es más confiable. La mediana de incertidumbre (2.56) y el P90 (3.72) muestran un control adecuado.

BS - Brillo Solar

Se seleccionó nuevamente el método RF para interpolación. La red usada fue reducida: 20 estaciones. La incertidumbre es alta en todo el dominio, con mediana 29.39 y P90 41.63. La diferencia borde/estaciones es mínima (relación 1.02), lo que indica que el problema principal no es solo el borde, sino la baja densidad espacial y posiblemente la dificultad de representar brillo solar con las covariables disponibles.

El RMSE de 36.22 y MAE de 27.95 son altos en relación con la magnitud de la variable, reflejando que la interpolación de BS es particularmente desafiante.

HR - Humedad Relativa

Para esta variable se seleccionó el método RK. Aunque los productos se generaron completos, las métricas son débiles: RMSE 20.70, MAE 15.47 y KGE negativo (-0.546). El KGE negativo indica que el modelo no reproduce adecuadamente la variabilidad espacial y temporal de la humedad relativa, siendo inferior a una predicción basada en la media.

La incertidumbre es alta (mediana 15.89, media 17.12) y no disminuye cerca de estaciones (relación 0.99). Esto sugiere que HR es una de las variables menos confiables de la interpolación actual. El máximo de 76.06 indica zonas donde la incertidumbre es extremadamente alta.

VV - Velocidad del Viento

Se seleccionó RK como metodología de interpolación. Tiene sesgo casi nulo (0.03), pero KGE negativo (-0.395), lo que indica que aunque no está desplazada en promedio, no reproduce bien la variabilidad espacial y temporal.

La incertidumbre típica es baja (mediana 0.88, media 1.05), pero hay máximos locales fuertes (21.04), probablemente asociados a zonas donde la extrapolación espacial es más inestable. El P90 de 1.69 muestra que la mayoría del dominio tiene incertidumbre controlada.

4.3.5 CONCLUSIONES PROCESO DE INTERPOLACIÓN

Los productos generados en el proceso de interpolación, constituyen una base técnica adecuada y consistente para apoyar el análisis regional de balance hídrico. La interpolación se realizó con un enfoque metodológico robusto que incluye:

1. Selección única por variable: Para cada variable se seleccionó una única metodología global mediante validación cruzada espacial con criterios jerárquicos (RMSE, MAE, KGE, sesgo), evitando cambios arbitrarios de método por celda, estación o fecha.
2. Superficies completas: Se generaron rasteres mensuales, anuales y climatológicos completos para el período 1995-2024, manteniendo coherencia metodológica entre variables.
3. Gestión de la incertidumbre: Se incorporaron rasteres de incertidumbre empírica (CV-RMSE) y su clasificación categórica (baja/media/alta) que permiten valorar la confiabilidad espacial de los resultados.

El producto tiene especial valor porque integra de forma homogénea la información disponible para el período 1995-2024, manteniendo coherencia metodológica entre variables y evitando cambios arbitrarios. Esto permite utilizar las superficies resultantes como insumos climáticos continuos para evaluar patrones espaciales y temporales del balance hídrico.

Las métricas obtenidas reflejan un desempeño compatible con un análisis regional, considerando particularmente que algunas variables climáticas dependen de procesos locales y de la densidad de estaciones disponible. En este contexto, la validación cruzada y los mapas de incertidumbre no debilitan el producto, sino que fortalecen su uso técnico, porque permiten reconocer dónde las estimaciones tienen mayor respaldo espacial y cómo incorporar esa información en la interpretación de los resultados.

Análisis diferencial por variable:

- Alta confianza: TMIN y P presentan el mejor equilibrio entre métricas y control de incertidumbre.
- Confianza moderada: TMAX y TMED son utilizables, especialmente en zonas con estaciones, pero con conciencia de sus limitaciones (RMSE alto en TMAX, KGE bajo en TMED).
- Confianza limitada: BS tiene incertidumbre alta debido a la baja densidad de estaciones; útil para patrones regionales pero no para valores puntuales.
- Confianza baja: HR y VV muestran KGE negativo, lo que indica que no reproducen adecuadamente la variabilidad; deben usarse con extrema cautela como variables auxiliares.

Para fines de balance hídrico, donde interesa principalmente la representación integrada de condiciones mensuales, anuales y climatológicas, las superficies interpoladas son suficientemente consistentes y trazables. Su uso es apropiado siempre que se acompañe de la lectura de los mapas de confiabilidad, especialmente para diferenciar zonas de mayor soporte observacional y zonas donde la incertidumbre relativa es más alta

4.4 CÁLCULOS EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL, ETP

La Evapotranspiración potencial (ETP), es un parámetro hidrológico fundamental que cuantifica la pérdida de agua desde una superficie vegetal de referencia, uniforme y en condiciones óptimas de humedad, hacia la atmósfera. Este proceso integra dos fenómenos: la evaporación del agua desde el suelo y la transpiración a través de los estomas de las plantas.

La ETP es un componente esencial en el balance hídrico, ya que representa la demanda evaporativa de la atmósfera y permite estimar la cantidad de agua que un cultivo o ecosistema requiere para satisfacer su crecimiento y desarrollo. Su cálculo preciso es crucial para la planificación de recursos hídricos, el diseño de sistemas de riego y la gestión de cuencas hidrográficas, especialmente en regiones con alta variabilidad climática como la Sabana de Bogotá.

El presente informe documenta el proceso de cálculo de rasteres mensuales de ETP para el periodo 1995-2024, utilizando como método principal la ecuación FAO-56 Penman-Monteith (Allen, 1998). Además, se incluyen dos métodos alternativos: Hargreaves modificado para Colombia (IDEAM, ENA 2018, 2022) y Priestley-Taylor (1972) con el fin de realizar un análisis de sensibilidad metodológica. Es importante enfatizar que esta comparación no constituye una validación contra valores observados de ETP, sino que busca evaluar el comportamiento relativo de los métodos bajo las condiciones locales.

4.4.1 METODOLOGÍA

Para el cálculo de los rasteres de ETP se procesan las series mensuales de las variables climáticas: TMAX, TMED, TMIN, brillo solar, humedad relativa y viento para el periodo 1995-2024.

1. FAO-56 Penman-Monteith (PM)

Esta es la ecuación estándar recomendada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para el cálculo de la ETP, ya que combina fundamentos físicos y empíricos para estimar el flujo de vapor de agua de una superficie de referencia. Se considera el método más robusto y universalmente aplicable, siempre que se disponga de datos climáticos suficientes. Su forma general es:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med}+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad (25)$$

Donde:

ET_o: ETP diaria (mm día⁻¹).

R_n: Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).

G: Flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹), considerado como 0 para escalas diarias.

T_med: Temperatura media del aire (°C).

u_2: Velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}).

e_s: Presión de vapor de saturación (kPa).

e_a: Presión de vapor real (kPa).

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación (kPa $°C^{-1}$).

γ: Constante psicrométrica (kPa $°C^{-1}$).

La radiación neta (R_n) se estimó a partir del balance entre la radiación de onda corta entrante y la saliente, y la de onda larga. Para la estimación de la radiación solar (R_s), se utilizó la ecuación de Angstrom-Prescott con coeficientes estándar a_s=0.25 y b_s=0.50, dado que no se disponía de una calibración local a partir de datos observados.

2. Hargreaves Modificado Colombia (HCol)

Esta fórmula empírica fue adaptada para el territorio colombiano y requiere únicamente datos de temperatura y radiación extraterrestre, lo que la hace útil en zonas con datos climáticos limitados. Su expresión es:

$$ET_P = 0.00216 \cdot (T_{med} + 17.78) \cdot R_o \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.47} \qquad (26)$$

Donde:

ET_P: ETP mensual (mm mes^{-1}).

R_o: Radiación extraterrestre mensual, convertida a mm mes^{-1} (0.408 * Ra * días_mes).

3. Priestley-Taylor (PT)

Es una versión simplificada de la ecuación de Penman, que asume que la evaporación se produce únicamente por el término de radiación, introduciendo un coeficiente empírico α (alfa). La ecuación es:

$$ET_o = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \cdot \frac{R_n - G}{\lambda} \qquad (27)$$

Donde:

α: Coeficiente de Priestley-Taylor, configurado con un valor de 1.26.

λ: Calor latente de vaporización (MJ kg^{-1}), considerado constante.

Verificación de Cálculos con Paquete FAO56

Para garantizar la exactitud numérica de la implementación vectorizada en R, los cálculos de ETP diaria para los métodos FAO-56 y Hargreaves (estándar) fueron verificados puntualmente utilizando los paquetes oficiales de la FAO, FAO56 y Evapotranspiration. Se realizaron comparaciones para una muestra de celdas (píxeles y estaciones) en meses representativos de la serie (Enero, Abril, Julio, Octubre). La consistencia se evaluó mediante la diferencia absoluta promedio y máxima entre los valores calculados por las funciones vectorizadas y los paquetes externos, estableciendo un umbral de tolerancia de 1e-4 mm/día.

4.4.2 RESULTADOS

El proceso generó un conjunto de productos raster (Ver anexo 4) que se describen a continuación.

- **Productos Raster Generados:**

Rasteres Mensuales: Se produjeron 360 rasteres mensuales para cada método de ETP, correspondientes a los 30 años del periodo de estudio (1995-2024). Cada raster contiene valores de ETP en mm/mes.

Rasteres Anuales: Se generaron 30 rasteres anuales por método, representando la sumatoria de los 12 valores mensuales de cada año. La unidad es mm/año.

Climatologías Mensuales: Se crearon 12 rasteres por método que representan el promedio multianual para cada mes del año (mm/mes).

Media Anual Multianual: Se generó un raster final por método que es el promedio de los 30 totales anuales, representando la ETP media anual para todo el periodo de estudio (mm/año).

- **Resultados del Análisis de Sensibilidad**

El análisis de sensibilidad metodológica comparó los rasteres mensuales de los métodos alternativos (Hargreaves y Priestley-Taylor) contra el método principal FAO-56, y también entre sí. Los indicadores estadísticos se calcularon para cada fecha y se promediaron en todo el periodo.

Tabla 52. Resumen global del análisis de sensibilidad entre métodos

Método	PBIAS (%)	RMSD (mm/mes)	Diferencia Media (mm/mes)	Mediana Diferencia Relativa (%)	Corr. Pearson	% con error < 20%
HCol vs PM	25.09	30.40	22.90	26.37	0.37	35.04
PT vs PM	13.79	21.36	12.54	16.44	0.38	51.46
HCol vs PT	10.18	15.80	10.97	9.31	0.81	82.49

Nota: HCol=Hargreaves modificado Colombia, PM=Penmann-Monteith, PT= Priestley-Taylor.

Fuente: Elaboración propia

El método HCol tiende a sobrestimar consistentemente la ETP en comparación con PM (FAO-56), con un sesgo positivo (PBIAS) del 25% y una mediana de diferencia relativa del 26.37%. El 64.96% de los píxeles presentan un error relativo superior al 20%.

El método PT también sobrestima a FAO-56, pero con un sesgo menor (PBIAS del 13.79%), y presenta una concordancia espacial ligeramente mejor. Aun así, el 48.54% de los valores tienen un error relativo mayor al 20%.

La comparación entre HS y PT muestra una mayor concordancia entre sí (PBIAS del 10.18%), con una correlación de Pearson de 0.81, lo que indica que ambos métodos alternativos responden de manera similar a las variables climáticas de entrada, aunque se desvían sistemáticamente de FAO-56.

- **Verificación Numérica con Paquete FAO56**

La comparación puntual entre los cálculos vectorizados y los paquetes de la FAO confirmó una consistencia numérica perfecta.

Tabla 53. Resultados de la verificación con el paquete FAO56

N° Píxeles	N° Fechas	N° Casos	Dif. Abs. Media (mm/día)	Dif. Abs. Máx. (mm/día)	% Dentro de Tolerancia	Estado
195	30	5,850	0	0	100	Consistente

Fuente: Elaboración propia

Los resultados demuestran que la implementación vectorizada reproduce exactamente los resultados de los paquetes de referencia, validando la integridad del proceso de cálculo. La presencia de diferencias nulas (0) para todos los casos evaluados indica una replicación numérica perfecta.

4.4.3 CONCLUSIONES

Cobertura Integral: Se completó exitosamente el cálculo de la ETP para el periodo 1995-2024, generando un conjunto de 1,209 productos raster (mensuales, anuales, climatologías y medias) para los tres métodos evaluados.

Robustez del Cálculo Principal: La implementación de la ecuación FAO-56 Penman-Monteith fue verificada numéricamente, mostrando una consistencia perfecta con los paquetes estándar de la FAO.

Comportamiento de los Métodos Alternativos:

El método de Hargreaves adaptado para Colombia sobrestima significativamente los valores de FAO-56, con un sesgo promedio del 25% y una alta proporción de píxeles con diferencias relativas superiores al 20%. Esto sugiere que, si bien su uso puede ser necesario en zonas con datos limitados, no es un sustituto directo de FAO-56 en la región de estudio.

El método de Priestley-Taylor también sobrestima a FAO-56, aunque con menor intensidad (sesgo del 14%). Sin embargo, sigue mostrando divergencias importantes (>20%) en casi la mitad del área estudiada.

4.5 BALANCE HÍDRICO REGIONAL

El balance hídrico constituye la base metodológica para estimar la oferta hídrica bruta superficial y la recarga potencial en las cuencas de interés. Su importancia radica en que permite representar, de manera integrada y trazable, la forma en que la precipitación se transforma en evapotranspiración real, almacenamiento temporal en el suelo, escorrentía superficial, flujo lateral, percolación y recarga. A diferencia de una estimación directa

basada únicamente en caudales observados o rendimientos regionales, el balance hídrico permite reconstruir la condición hidrológica natural a partir de variables climáticas, fisiográficas, edáficas y geológicas, lo cual resulta fundamental cuando se requiere evaluar fuentes de abastecimiento y contrastar periodos secos, condiciones medias y respuestas espaciales diferenciadas.

En esta sección se presenta, en primer lugar, el análisis de antecedentes metodológicos relevantes para la estimación de oferta hídrica y recarga, incluyendo enfoques de balance superficial, balances hidrogeológicos, modelos distribuidos de humedad del suelo y criterios de validación regional. Posteriormente, se describe el modelo de balance hídrico adoptado para el estudio, exponiendo su formulación conceptual, las ecuaciones empleadas, los datos de entrada, las metodologías de asignación de parámetros y los procedimientos de calibración y validación. Esta descripción permite identificar qué componentes son observados, cuáles son derivados de información secundaria y cuáles corresponden a parámetros ajustados dentro del modelo.

El capítulo también presenta los principales resultados generados por el balance hídrico, incluyendo las salidas de oferta hídrica superficial, recarga potencial y series mensuales y anuales para las unidades de análisis. Asimismo, se discuten las fortalezas y limitaciones estructurales del modelo, con énfasis en su capacidad para conservar el cierre de masa, representar la variabilidad espacial y temporal, y diferenciar entre respuesta rápida y componentes de flujo lento, así como en las restricciones asociadas a la resolución espacial, la disponibilidad de datos y la simplificación de procesos hidrogeológicos complejos.

Finalmente, se expone la aplicación del modelo para estimar la oferta hídrica bruta superficial y la recarga subterránea en las cuencas de interés. Como parte de esta aplicación, se generan series de caudal y rendimiento hídrico, junto con sus respectivas curvas de duración de caudales, las cuales permiten caracterizar la disponibilidad hídrica bajo diferentes niveles de permanencia y apoyar el análisis posterior de fuentes abastecedoras, condiciones críticas y criterios de aprovechamiento.

4.5.1 ANTECEDENTES METODOLÓGICOS CONSIDERADOS

En esta sección se analizan diferentes metodologías empleadas para el cálculo del balance hídrico tratando de identificar los criterios y métodos empleados para construir el balance mensual distribuido para evaluar oferta en meses secos y recarga. Por eso la revisión no se limita a comparar resultados numéricos, sino que contrasta formulación de precipitación, ETP/ETR, almacenamiento, escorrentía, infiltración/recarga, validación y escala temporal.

Para esta comparación se escogen los modelos de balance empleados por el IDEAM (2022) para el Estudio Nacional de Aguas, el modelo del informe antecedente del Consorcio Redes. (2016), los balances del Ingeominas (1987 y Bastidas, 2022) para la Sabana de Bogotá y en el cañón del río Cauca, los balances en la sabana de Bogotá elaborados por JICA (2003), SIAM-CAR (2006) y documentos teóricos del tema (Aparicio Mijares – UNESCO, 2006).

En la Tabla 54 se realiza dicha comparación.

Tabla 54. Comparación de metodologías para elaboración de un balance hídrico regional

Informe	Metodologia de balance empleada	Criterios y ecuaciones relevantes	Utilidad para esta actualizacion	Soporte
ENA 2022 / OHTS	Balance hidrico superficial de largo plazo para oferta hidrica total superficial; escala mensual multianual y anual multianual.	ESC = P - ETR; ETR por Budyko; ETP por Penman-Monteith FAO o Hargreaves modificada; OHTS = ESC * A * k; validacion con escorrentia observada Q/A.	Se usa como metodo de verificacion agregada. Su supuesto de DeltaS despreciable es util en promedio multianual, pero no para meses secos ni recarga mensual.	IDEAM ENA 2022; IDEAM 2020; Budyko 1974; FAO-56.
Redes Sabana	Analisis regional orientado a abastecimiento y fuentes, con uso de cartografia hidrogeologica y resultados de recarga potencial.	Priorizacion de zonas de interes para acueductos, oferta regional y relacion con unidades hidrogeologicas; recarga tratada como potencial o zonificada.	Aporta pertinencia territorial y zonas de contraste, pero no debe tomarse como recarga efectiva sin verificacion con niveles, caudales base o modelo hidrogeologico.	Informe CND-CRS-DIA-ACU-P3-V4.
Ingeominas 1987	Balance con enfasis en hidrologia subterranea en la Sabana suroccidental; estima infiltracion potencial en afloramientos y revisa flujo base.	Entradas y salidas superficiales/subterraneas, infiltracion potencial, infiltracion real por separacion de hidrogramas y reconstruccion de caudales.	Sirve como linea base historica y orden de magnitud; se actualiza por antiguedad de series, vacios y cartografia menos detallada.	INGEOMINAS-CAR 1987; metodos clasicos de hidrograma/baseflow.
JICA	Estudio hidrogeologico integral con balance de suelo, pozos, niveles, calidad, isotopia, geofisica y modelo 3D.	Evalua recarga y explotacion; propone rendimiento seguro menor que 60% de la recarga como criterio de manejo.	Es el antecedente mas fuerte para interpretar recarga frente a acuiferos reales. La actualizacion debe producir recarga potencial espacialmente trazable.	JICA/EAAB; criterios de manejo hidrogeologico regional.
SIAM/CAR	Balance hidroclimatico SIG y modelacion MODFLOW; calcula excesos hidricos y los cruza con hidrogeologia.	ETP por Turc; mapas raster; depuracion con dobles masas; exceso hidrico como base para recarga por regiones hidrogeologicas.	Se conserva el enfoque SIG y el vinculo exceso-geologia. Se actualiza ETP a FAO-56 y se introduce almacenamiento mensual explicito.	SIAM/CAR; MODFLOW; metodo de Turc como antecedente.

Informe	Metodologia de balance empleada	Criterios y ecuaciones relevantes	Utilidad para esta actualizacion	Soporte
SGC/Ingeominas 2022	Balance distribuido de suelo con SWB para recarga potencial directa.	P, temperatura, cobertura, suelos, numero de curva y unidades hidrogeologicas; cierre de balance reportado.	Referente moderno de modelacion distribuida y cierre de masa. El numero de curva queda como sensibilidad, no como metodo mensual base.	Bastidas et al. 2022; USGS SWB; Thornthwaite-Mather.
UNESCO PHI-LAC	Guia de balance hidrico integrado por cuencas.	Entradas, salidas, almacenamiento, recarga natural/inducida/artificial, bombeo, retornos, validacion e incertidumbre.	Aporta marco de calidad: trazabilidad, cierre de masa, separacion superficial-subterranea y reporte de incertidumbre.	UNESCO PHI-LAC 2006.

Fuente: Elaboración propia

La conclusión metodológica del antecedente es que ENA/OHTS sirve para verificar oferta superficial agregada; JICA y SIAM son los soportes hidrogeológicos locales principales; Ingeominas aporta línea base histórica; SGC/SWB aportan estructura moderna de balance distribuido; y UNESCO aporta el estándar de cierre, trazabilidad e incertidumbre. Todos estos aspectos son considerados dentro del balance hídrico elaborado.

4.5.2 BALANCE HÍDRICO EMPLEADO

El modelo final es un balance hídrico mensual distribuido por celda de 1 km, con dos almacenamientos diferenciados: almacenamiento de suelo S y almacenamiento lento/subterráneo GW. La ecuación de masa del suelo se evalúa por pixel y mes; la salida superficial total para oferta se obtiene sumando respuesta rápida y descarga base retardada.

Las ecuaciones empleadas se listan a continuación y su explicación se ordena en la Tabla 55.

$$P = I + ETa + Qs + Qlat + Perc + dS \quad (28)$$

$$S_t = S_(t-1) + Pnet - ETa - Qs - Qlat – Perc \quad (29)$$

$$Qtotal = Qrapido + Qbf \quad (30)$$

$$Qrapido = Qs + (1 - qlat_slow_frac) * Qlat \quad (31)$$

$$Entrada_lenta = qlat_slow_frac * Qlat + rec_bf_frac * Recarga \quad (32)$$

$$GW_t = GW_(t-1) + Entrada_lenta_t - Qbf_t \quad (33)$$

$$Qbf_t = k_bf * GW_t \quad (34)$$

Tabla 55. Componentes modelo de balance hídrico

Variable	Nombre / significado	Unidad	Obtención o ecuación	Función dentro del balance
after_ET	Agua remanente después de ETa	mm	after_ET = max(S + Pnet - ETa, 0)	Estado intermedio antes de calcular Qs
after_Qlat	Agua remanente después de Qlat	mm	after_Qlat = max(after_Qs - Qlat, 0)	Estado intermedio antes de calcular Perc
after_Qs	Agua remanente después de Qs	mm	after_Qs = max(after_ET - Qs, 0)	Estado intermedio antes de calcular Qlat
AWC	Capacidad de agua disponible	mm	AWC = clip((80 + 120*(1 - soil_norm))*s_scale, 40, 260)	Base para definir los umbrales de almacenamiento
Cstore	Capacidad efectiva mensual de intercepción	mm/mes	Cstore = clip(c_canopy * (1 - f_imperv), 0.05, 4.5)	Limita la intercepción según cobertura e impermeabilidad
c_canopy	Parámetro base de capacidad de intercepción	mm/mes	Parámetro calibrado/fijo	Controla la magnitud máxima de Cstore
dS	Cambio de almacenamiento del suelo	mm/mes	dS = S_t - S_(t-1)	Término de cierre del balance de masa del suelo
Entrada_lenta	Entrada al reservorio lento	mm/mes	Entrada_lenta = qlat_slow_frac*Qlat + rec_bf_frac*Recarga	Alimenta el almacenamiento lento/subterráneo
ETa	Evapotranspiración real	mm/mes	ETa = min(Ks*Kc*ETP, max(S + Pnet - S_perm, 0))	Salida real de agua hacia la atmósfera

Variable	Nombre / significado	Unidad	Obtención o ecuación	Función dentro del balance
ETP	Evapotranspiración potencial o de referencia	mm/mes	Raster mensual de ETP	Demanda atmosférica de referencia
f_imperv	Factor de impermeabilidad	adimensional	Derivado de cobertura: clip(...)	Controla Qimperv e influye en Kc y Cstore
f_rec_base	Factor base de recarga	adimensional	Parámetro calibrado	Escala regionalmente rec_factor
f_slope	Factor de pendiente	adimensional	f_slope = clip(sqrt(pendiente_pct/100), 0.05, 1.5)	Incrementa Qlat y reduce la favorabilidad de recarga
geol_perm	Permeabilidad geológica relativa	adimensional	geol_perm = clip(0.35 + 0.85*(1 - geo_norm), 0.05, 1.30)	Controla Perc
GW_(t-1)	Almacenamiento lento al inicio del mes	mm	Estado heredado del mes anterior	Memoria hidrológica asociada al flujo base
GW_t	Almacenamiento lento al final del mes	mm	GW_t = GW_(t-1) + Entrada_lenta_t - Qbf_t	Estado actualizado del reservorio lento
I	Intercepción	mm/mes	I = min(P, Cstore * min(P/50, 1))	Agua retenida por la cobertura antes de llegar al suelo
impervious_factor	Factor de escorrentía impermeable	adimensional	Parámetro calibrado	Controla qué fracción de Pnet sobre superficies impermeables pasa a Qimperv
infil_excess_factor	Factor de escorrentía por exceso de infiltración	adimensional	Parámetro calibrado	Controla la intensidad de Qinf
Kc	Coeficiente de cobertura/cultivo	adimensional	Kc = clip((0.55 + 0.65*(1 -	Convierte ETP en demanda potencial de la cobertura

Variable	Nombre / significado	Unidad	Obtención o ecuación	Función dentro del balance
			f_imperv))*kc_scale, 0.25, 1.25)	
kc_scale	Factor de escala de Kc	adimensional	Parámetro calibrado	Ajusta regionalmente la demanda evapotranspirativa
k_bf	Coeficiente de descarga del reservorio lento	1/mes	Parámetro calibrado	Controla la velocidad de descarga de GW hacia Qbf
k_lat	Coeficiente de flujo lateral	1/mes	Parámetro calibrado	Controla la magnitud de Qlat
k_perc	Coeficiente de percolación	1/mes	Parámetro calibrado	Controla la magnitud de Perc
Ks	Factor de estrés hídrico	adimensional	Ks = clip((S - S_perm)/((1 - p_stress)*(S_fc - S_perm)), 0, 1)	Reduce la ETa cuando el suelo no tiene humedad suficiente
Ksat_month	Capacidad efectiva mensual de infiltración	mm/mes	Ksat_month = clip((35 + 120*(1 - soil_norm))*ksat_scale, 10, 250)	Controla el umbral de Qinf
ksat_scale	Factor de escala de infiltración efectiva	adimensional	Parámetro calibrado	Ajusta regionalmente Ksat_month
overflow	Excedente sobre saturación del suelo	mm/mes	overflow = max(after_Qlat - Perc - S_sat, 0)	Se suma a Qs para conservar masa cuando se supera S_sat
P	Precipitación mensual total	mm/mes	Raster mensual de precipitación	Entrada principal de agua al sistema
Perc	Percolación bajo zona radicular	mm/mes	Perc = min(after_Qlat, k_perc * max(after_Qlat - S_fc, 0) * geol_perm)	Drenaje vertical que puede convertirse en recarga

Variable	Nombre / significado	Unidad	Obtención o ecuación	Función dentro del balance
Pnet	Precipitación neta	mm/mes	Pnet = max(P - I, 0)	Agua disponible después de la intercepción
p_stress	Umbral de estrés hídrico	adimensional	Parámetro calibrado	Define desde qué nivel de agotamiento del suelo se reduce la ETa
Qbf	Caudal base o descarga del reservorio lento	mm/mes	Qbf_t = k_bf * GW_t	Componente retardado que sostiene caudales en meses secos
Qimperv	Escorrentía por áreas impermeables	mm/mes	Qimperv = impervious_factor * f_imperv * Pnet	Componente inmediato asociado a impermeabilidad
Qinf	Escorrentía por exceso de infiltración	mm/mes	Qinf = infil_excess_factor * RI * max(Pnet - Ksat_month, 0)	Escorrentía cuando Pnet supera la infiltración efectiva mensual
Qlat	Flujo lateral	mm/mes	Qlat = min(after_Qs, k_lat * max(after_Qs - S_fc, 0) * f_slope)	Drenaje lateral desde el suelo cuando hay excedente sobre capacidad de campo
Qrapido	Caudal rápido	mm/mes	Qrapido = Qs + (1 - qlat_slow_frac) * Qlat	Parte de la respuesta hidrológica que llega rápidamente al cauce
Qs	Escorrentía superficial rápida	mm/mes	Qs = min(after_ET, Qimperv + Qsat + Qinf); Qs = Qs + overflow	Componente rápido directo de generación de caudal
Qsat	Escorrentía por saturación	mm/mes	Qsat = sat_runoff_shape * RI * max(after_ET - S_fc, 0)	Escorrentía cuando el agua disponible supera capacidad de campo
Qtotal	Oferta hídrica superficial total modelada	mm/mes	Qtotal = Qrapido + Qbf	Variable principal para estimar oferta hídrica superficial bruta

Variable	Nombre / significado	Unidad	Obtención o ecuación	Función dentro del balance
qlat_slow_frac	Fracción lenta del flujo lateral	adimensional	Parámetro calibrado	Divide Qlat entre componente rápido y entrada al reservorio lento
Recarga	Recarga potencial	mm/mes	Recarga = Perc * rec_factor	Fracción de Perc que alimenta el sistema lento/subterráneo
rec_bf_frac	Fracción de recarga que alimenta flujo base	adimensional	Parámetro calibrado	Define la porción de Recarga que entra al reservorio lento GW
rec_factor	Factor espacial de recarga	adimensional	rec_factor = clip(f_rec_base*(0.35 + 0.75*(1 - geo_norm))*(1 - 0.35*f_slope), 0.05, 0.90)	Define qué parte de Perc se transforma en Recarga
RI	Índice de propensión a escorrentía	adimensional	RI = clip(0.15 + 0.55*soil_norm + 0.20*f_slope + 0.30*f_imperv, 0.05, 0.95)	Regionaliza Qsat y Qinf según suelo, pendiente e impermeabilidad
S	Almacenamiento de humedad del suelo	mm	Estado mensual del reservorio de suelo	Controla ETa, excedentes, flujo lateral, percolación y dS
S_(t-1)	Almacenamiento del suelo al inicio del mes	mm	Estado heredado del mes anterior	Memoria hidrológica del suelo
S_fc	Almacenamiento a capacidad de campo	mm	S_fc = 0.70 * AWC	Umbral para escorrentía por saturación, flujo lateral y percolación
S_perm	Almacenamiento no extraíble	mm	S_perm = 0.25 * AWC	Límite inferior de agua disponible para ETa

Variable	Nombre / significado	Unidad	Obtención o ecuación	Función dentro del balance
S_sat	Almacenamiento de saturación	mm	S_sat = 1.15 * AWC	Límite superior del almacenamiento del suelo
S_t	Almacenamiento del suelo al final del mes	mm	S_t = S_(t-1) + Pnet - ETa - Qs - Qlat - Perc	Estado actualizado para el siguiente mes
sat_runoff_shape	Factor de forma de escorrentía por saturación	adimensional	Parámetro calibrado	Controla la intensidad de Qsat
s_scale	Factor de escala de almacenamiento	adimensional	Parámetro calibrado	Ajusta regionalmente AWC

Nota: la función clip(x, a, b) = a, si x < a ; clip(x, a, b) = x, si a <= x <= b y clip(x, a, b) = b, si x > b

Fuente: Elaboración propia

Las variables asignadas a partir de la información secundaria del DEM del proyecto, POMCA del río Bogotá (GDB convenio 277) de suelos, cobertura, geología y permeabilidad se tabula a continuación.

Tabla 56. Variables asignadas a partir de información secundaria

Variable	Dato de entrada y campo utilizado	Regla o tabla de asignación / transformación	Fuente del dato y de la asignación
f_slope	DEM del proyecto (raster). Se deriva pendiente_pct.	No usa tabla categórica. Cálculo directo: f_slope = clip(sqrt(pendiente_pct/100), 0.05, 1.5).	DEM del proyecto
f_imperv	Cobertura de la tierra (vector/GDB, luego raster 1 km). Capa: CoberturaTierramatus; campo: N1_COBERT.	Reclasificación hidrológica de la cobertura para obtener cob_norm; luego f_imperv = clip(si cob_norm > 0.80: 0.35; si no: 0.03 + 0.15*cob_norm, 0, 0.85).	GDB convenio 277, CoberturaTierramatus/N1_COBERT; reclasificación
Kc	Cobertura de la tierra (vector/GDB, luego raster 1 km). Capa:	Usa la misma asignación hidrológica de cobertura de f_imperv. Kc = clip((0.55 + 0.65*(1 - f_imperv))*kc_scale, 0.25, 1.25).	GDB convenio 277 + parámetro calibrado kc_scale.

Variable	Dato de entrada y campo utilizado	Regla o tabla de asignación / transformación	Fuente del dato y de la asignación
	CoberturaTierramatus; campo: N1_COBERT; usa f_imperv.		
AWC	Suelos (vector/GDB, luego raster 1 km). Capa: suelos_m; campo: Ponderacio.	Cuando valores altos de Ponderación representan mayor permeabilidad se usa inversión 6 - Ponderación; luego normalización P5-P95 a soil_norm. AWC = clip((80 + 120*(1 - soil_norm))*s_scale, 40, 260).	GDB convenio 277, suelos_m/Ponderacio + parámetro calibrado s_scale.
Ksat_month	Suelos (vector/GDB, luego raster 1 km). Capa: suelos_m; campo: Ponderación.	Misma asignación de suelo usada para AWC: inversión 6 - Ponderación cuando aplica y normalización P5-P95 a soil_norm. Ksat_month = clip((35 + 120*(1 - soil_norm))*ksat_scale, 10, 250).	GDB convenio 277, suelos_m/Ponderación + parámetro calibrado ksat_scale; transformación implementada en el modelo v4.
RI	Suelos (suelos_m/Ponderación), cobertura (CoberturaTierramatus/N1_COBERT) y DEM (raster).	Combina las asignaciones de soil_norm, f_imperv y f_slope: RI = clip(0.15 + 0.55*soil_norm + 0.20*f_slope + 0.30*f_imperv, 0.05, 0.95).	GDB convenio 277 + DEM del proyecto; combinación implementada.
geol_perm	Geología (vector/GDB: GEOLOGIA_M, campo Pon) y zonas de recarga (vector/GDB: recarga, campo Trecarga), luego raster 1 km.	Pon se invierte como 6 - Pon; la favorabilidad de Trecarga se invierte y se combina 60% geología + 40% recarga para formar geo_norm. geol_perm = clip(0.35 + 0.85*(1 - geo_norm), 0.05, 1.30).	GDB convenio 277, GEOLOGIA_M/Pon y recarga/Trecarga; combinación.
rec_factor	Geología (GEOLOGIA_M/Pon), zonas de recarga (recarga/Trecarga) y DEM para f_slope; capas vectoriales rasterizadas a 1 km mas raster DEM.	Usa geo_norm de la combinación 60% geología + 40% recarga y f_slope. rec_factor = clip(f_rec_base*(0.35 + 0.75*(1 - geo_norm))*(1 - 0.35*f_slope), 0.05, 0.90).	GDB convenio 277 + DEM del proyecto + parámetro calibrado f_rec_base.

Fuente: Elaboración propia

4.5.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO DE BALANCE HÍDRICO

La calibración final del modelo de balance hídrico se realizó utilizando las 129 microcuencas hidrográficas definidas por el POMCA del río Bogotá como unidades espaciales de contraste. De cada microcuenca se emplea la climatología promedio mensual multianual de los caudales característicos reportados por el POMCA, obteniendo hasta 1.548 valores mensuales de comparación, correspondientes a 129 microcuencas × 12 meses.

Para efectos de la calibración, los valores del POMCA se consideran variables hidrológicas de referencia y se comparan con variables equivalentes obtenidas a partir de la simulación del balance hídrico. Las variables de referencia consideradas son los promedios mensuales multianuales del caudal medio mensual (Qmedio), del caudal mínimo mensual (Qmin) y del caudal máximo mensual (Qmax) para cada microcuenca y mes del año. Por su parte, el modelo calcula mensualmente, para el período 1995-2024, la oferta superficial total (Qtotal), definida como la suma del componente rápido y el flujo base. Los valores raster de (Qtotal) son agregados espacialmente a cada una de las 129 microcuencas POMCA y resumidos a la misma escala climatológica mensual empleada por el POMCA, generando así las variables simuladas Qmedio_sim, Qmin_sim y Qmax_sim, que se confrontan respectivamente con Qmedio_POMCA, Qmin_POMCA y Qmax_POMCA. De esta forma, la calibración no compara directamente precipitación, evapotranspiración o recarga con el POMCA, sino la respuesta integrada del modelo expresada como caudal superficial total.

El desempeño de cada conjunto de parámetros se evalúa mediante el criterio eficiencia de Kling-Gupta (KGE), definida como:

KGE=1-sqrt{(r-1)^2+(alpha-1)^2+(beta-1)^2} (35)

donde (r) es el coeficiente de correlación de Pearson entre los valores simulados y de referencia y evalúa la capacidad del modelo para reproducir su variación; (alpha=sigma_sim/sigma_obs) representa la relación entre las desviaciones estándar simulada y observada y, por tanto, mide la reproducción de la variabilidad; y (beta=mu_sim/mu_obs representa la relación entre las medias simulada y observada y mide el sesgo de magnitud. El valor óptimo de los tres componentes es 1 y, consecuentemente, el valor óptimo de KGE es igualmente 1. Esta formulación permite que la calibración considere simultáneamente correlación, variabilidad y sesgo, en lugar de ajustar exclusivamente las diferencias absolutas entre caudales.

En la calibración se calculan separadamente KGE_Qmedio, KGE_Qmax y KGE_Qmin. Adicionalmente, se calcula el KGE del caudal medio transformado logarítmicamente, KGE_log Qmedio, con el propósito de aumentar la sensibilidad de la función objetivo a los caudales relativamente bajos, y se incluye un término asociado al sesgo. Estos componentes se integran mediante la función ponderada:

Score_Q = 0.40*KGE_Qmedio + 0.25*KGE_Qmax + 0.20*KGE_Qmin + 0.10*KGE_log_Qmedio + 0.05*Score_sesgo (36)

Score_sesgo = 1 - | Pbias | / 80 (37)

Por tanto, la mayor ponderación se asigna a la reproducción del régimen de caudales medios mensuales, que representa el comportamiento general de la oferta hídrica, mientras que los caudales máximos y mínimos incorporan información sobre los extremos del régimen. La transformación logarítmica complementa específicamente el ajuste de las condiciones de menor caudal.

Para la versión final se obtuvieron 1.524 pares válidos para (Qmedio) y 1.548 pares para (Qmin) y (Qmax), obteniéndose valores de KGE de 0,800, 0,285 y 0,615, respectivamente.

La exploración del espacio paramétrico se realizó mediante muestreo por hipercubo latino (Latin Hypercube Sampling, LHS). Este procedimiento divide el rango admisible de cada parámetro en intervalos y genera combinaciones que cubren de manera más uniforme el espacio multidimensional que un muestreo aleatorio simple. En la calibración se evaluaron 600 conjuntos de parámetros dentro de los rangos previamente establecidos para 13 parámetros ajustables. Para cada conjunto se ejecutó nuevamente el balance hídrico, se agregaron los resultados a las 129 microcuencas y se calcularon las métricas anteriores. Por consiguiente, el LHS es el mecanismo utilizado para generar las posibles combinaciones de parámetros, pero no constituye por sí mismo el criterio de selección.

Los resultados de estas simulaciones se analizan posteriormente bajo el enfoque MCAT (Monte Carlo Analysis Toolbox). MCAT utiliza la población de simulaciones previamente obtenida para estudiar la relación entre los parámetros y el desempeño del modelo, identificar los parámetros a los cuales la respuesta es más sensible, reconocer regiones del espacio paramétrico asociadas con mejores resultados y detectar posibles problemas de identificabilidad o compensación entre parámetros. De este modo, MCAT permite interpretar la estructura de la calibración y evaluar si parámetros diferentes producen respuestas hidrológicas similares.

Complementariamente se aplica el enfoque GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), basado en el principio de equifinalidad. Bajo este enfoque no se supone que exista necesariamente un único conjunto de parámetros capaz de representar correctamente la cuenca; por el contrario, diferentes combinaciones pueden producir simulaciones suficientemente consistentes con la información disponible. Los conjuntos evaluados se clasifican según su desempeño y se distinguen aquellos que presentan un comportamiento aceptable o “conductual” de aquellos que no cumplen los criterios establecidos. De esta forma, GLUE permite analizar la incertidumbre paramétrica y evita interpretar el conjunto de parámetros con mayor puntuación como una solución única e inequívoca del sistema hidrológico.

La selección final no depende únicamente del ajuste de los caudales. La función de desempeño hidrológico se combina finalmente con criterios de consistencia física mediante:

$$Score_total = 0.82 \times Score_Q + 0.18 \times Score_fisico \quad (38)$$

El Score_fisico representa la consistencia del modelo respecto a la recarga anual, variable a cuya valoración se dio especial importancia para que el ajuste de caudales superficiales no la minimizara.

$$Score_físico = \min(1, 0.55 + 0.045\ Recarga) \quad (39)$$

Por tanto, una recarga ≥10 mm/año produce un valor de Score_físico=1.

Adicionalmente, se establece como criterio obligatorio que el error de balance sea inferior al 5 %; las simulaciones que superan este valor son descartadas independientemente de su ajuste frente a los caudales del POMCA.

$$Error_{balance}(\%) = 100\frac{|Entradas - Salidas - \Delta Almacenamiento|}{Entradas} \quad (40)$$

En síntesis, el procedimiento de calibración sigue la secuencia: (1) definición de los rangos de los parámetros; (2) generación de combinaciones mediante hipercubo latino; (3) ejecución del balance mensual 1995-2024 para cada combinación; (4) agregación de (Qtotal) a las 129 microcuencas POMCA; (5) construcción de las variables simuladas equivalentes a (Qmedio), (Qmin) y (Qmax); (6) comparación con las variables de referencia del POMCA mediante KGE y métricas complementarias; (7) análisis de sensibilidad y comportamiento de los parámetros mediante MCAT; (8) clasificación de conjuntos conductuales y análisis de equifinalidad mediante GLUE; y (9) selección del conjunto final considerando conjuntamente desempeño estadístico y consistencia física.

Los parámetros y métricas finalmente obtenidos en el proceso de calibración del modelo se presentan en la Tabla 57 y en la Tabla 58.

Tabla 57. Parámetros modelo de balance hídrico

Parametro	Rango de valores	Valor final	Significado
kc_scale	0.45 - 1.00	0.805	Escala Kc/cobertura
p_stress	0.20 - 0.60	0.416	Umbral de estrés hídrico
ksat_scale	0.50 - 1.30	1.071	Infiltración efectiva
sat_runoff_shape	0.40 - 1.40	0.445	Escorrentía por saturación
infil_excess_factor	0.03 - 0.35	0.145	Exceso de infiltración
k_lat	0.30 - 1.20	0.320	Flujo lateral
k_perc	0.25 - 0.90	0.765	Percolación
f_rec_base	0.30 - 0.85	0.804	Factor base de recarga
s_scale	0.45 - 1.10	0.469	Almacenamiento de suelo
impervious_factor	0.55 - 1.00	0.848	Escorrentía impermeable
k_bf	0.06 - 0.20	0.113	Descarga del reservorio lento

Parametro	Rango de valores	Valor final	Significado
qlat_slow_frac	0.00 - 0.45	0.368	Fracción lenta del flujo lateral
rec_bf_frac	0.80 - 1.00	0.935	Fracción de recarga que alimenta Qbf
c_canopy	Fijo desde calibración previa. No producto de calibración actual.	0.843	Intercepción
c_route	Fijo desde calibración previa No producto de calibración actual.	0.870	Acumulación/ruteo entre polígonos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Métricas finales del modelo de balance hídrico

Indicador	Valor final	Interpretación
Simulación seleccionada	506	Mejor conjunto conductual
KGE_Qmedio	0,800	Buen ajuste del régimen medio mensual multianual
KGE_Qmax	0,615	Ajuste moderadamente bueno de caudales máximos
KGE_Qmin	0,285	Ajuste débil de caudales mínimos
KGE_logQmedio	0,772	Buen ajuste relativo al dar mayor importancia a caudales bajos
PBIAS	−17,11 %	Subestimación sistemática de la magnitud media
Score_sesgo	0,786	Penalización asociada al PBIAS
Score_Q	0,647	Desempeño hidrológico conjunto
Score_fisico	1,000	Cumple completamente el criterio de recarga utilizado en este score
Error medio de balance	0,00965	≈ 0,96 % si se expresa como fracción; muy inferior al 5 %

Score_total	0,711	Función objetivo global
Simulaciones evaluadas	600	LHS
Simulaciones conductuales	6 (1,0 %)	Conjuntos que superan el filtro GLUE

Fuente: Elaboración propia

La calibración del modelo de balance hídrico puede considerarse satisfactoria para la representación del comportamiento hidrológico medio a escala regional, con un KGE de 0,800 para los caudales medios mensuales multianuales y de 0,772 para su transformación logarítmica. La representación de los caudales máximos resulta aceptable (KGE = 0,615), mientras que los caudales mínimos presentan un desempeño sensiblemente menor (KGE = 0,285). Adicionalmente, permanece una subestimación media de aproximadamente 17 %, por lo que el ajuste no puede considerarse uniforme para todos los componentes del régimen hidrológico.

El análisis de la población de 600 simulaciones evidencia que únicamente seis conjuntos paramétricos cumplen los criterios conductuales establecidos. Sin embargo, dentro de estas soluciones varios parámetros conservan rangos relativamente amplios, indicando equifinalidad y una identificación paramétrica incompleta. El análisis de sensibilidad muestra además que el desempeño hidrológico está dominado por un número reducido de parámetros, particularmente los asociados a la generación de escorrentía y evapotranspiración, mientras que otros parámetros presentan una influencia comparativamente menor sobre la función objetivo. Estos resultados son relevantes desde el punto de vista de parsimonia, dado que el modelo emplea 15 parámetros, 13 de ellos recalibrados, junto con múltiples funciones y asignaciones espaciales, mientras la principal información utilizada para su calibración corresponde a los caudales característicos del POMCA.

La complejidad del modelo se justifica principalmente por su capacidad para representar de manera espacialmente distribuida y temporalmente continua los principales componentes del balance hídrico. A diferencia de una regionalización estadística del rendimiento, el modelo no se limita a estimar un valor medio de oferta, sino que reconstruye mensualmente, para el período 1995–2024, la evolución de la precipitación, evapotranspiración real, almacenamiento de humedad del suelo, escorrentía superficial, flujo lateral, percolación, recarga, almacenamiento lento y flujo base. Esto permite analizar no solo la magnitud media de cada componente, sino también su estacionalidad, variación interanual, respuesta durante períodos secos y húmedos y evolución de los almacenamientos que condicionan la disponibilidad hídrica.

Esta capacidad constituye una ventaja relevante para los objetivos de balance hídrico regional y, particularmente, para la estimación de recarga, que no podría obtenerse mediante un simple factor de regionalización de caudales.

No obstante, el modelo presenta limitaciones estructurales asociadas tanto a su escala de formulación como a la disponibilidad de información para su calibración. Se trata de un modelo regional distribuido, calibrado para reproducir de manera conjunta el

comportamiento hidrológico de la cuenca del río Bogotá, y no de un modelo calibrado individualmente para cada microcuenca abastecedora. Adicionalmente, no se dispone de mediciones de caudal que representen de manera inequívoca condiciones naturales en todas las unidades de análisis, ni de observaciones independientes y espacialmente representativas de varios de los componentes internos del balance, como evapotranspiración real, infiltración, percolación, recarga, flujo subterráneo, almacenamiento del suelo o aportes de flujo base, cuya medición directa a escala regional es limitada o particularmente compleja. En consecuencia, la calibración se sustenta principalmente en la respuesta integrada del sistema expresada mediante los caudales superficiales de referencia del POMCA, sin que sea posible verificar de manera independiente todos los procesos internos simulados. Estas limitaciones reducen la capacidad del modelo para reproducir con igual precisión el comportamiento particular de cuencas pequeñas y hacen que su transferencia desde la escala regional de calibración hacia las microcuencas abastecedoras requiera factores de ajuste asociados al cambio de escala geográfica. Dichos factores deben interpretarse, por tanto, como una corrección de regionalización necesaria para la aplicación local de la oferta hídrica superficial y no como una modificación del balance físico regional ni de los demás componentes simulados.

4.5.4 RESULTADOS DEL MODELO DE BALANCE HÍDRICO

El conjunto de cálculos e información raster generada a nivele mensual, anual y multianual del balance hídrico y la oferta hídrica se incluye en el Anexo 5, dentro del cual se encuentra la información enumerada en la Tabla 59.

Tabla 59. Salidas y ubicación de resultados del balance hídrico y oferta hídrica total superficial

Salida	Carpeta/archivo	Uso recomendado
Rasters del balance v4	01_RASTERS_BALANCE_HIDRICO_FINAL_v4	P, ETP, ETa, Qtotal, Recarga y agregados anuales/multianuales.
Tabla mensual POMCA	02_tablas/balance_pomca_mensual_modelado.csv	Validación y comparación por polígono POMCA.
Métricas POMCA	03_validacion/metricas_pomca.csv	KGE, PBIAS y RMSE de la versión v4 final.
Calibración	05_calibracion/ranking_calibracion_v4.csv y parametros_optimos_v4.json	Escenarios GLUE/MCAT y parámetros finales.
Microcuencas v4	02_MICROCUENCAS_ABASTECEDORAS_FINAL_v4	Series y rendimientos antes de corrección.

Salida	Carpeta/archivo	Uso recomendado
Microcuencas corregidas	02_MICROCUENCAS_ABASTECEDORAS_FINAL_CORREGIDO	Series finales corregidas de oferta/recarga para abastecedoras.
Rendimiento corregido v4b	03_RASTER_RENDIMIENTO_FINAL_CORREGIDO_v4b	Raster oficial de rendimiento regionalizado después de amplificación/corrección.
Q95-Q50 corregidos	011_RASTERS_Q95-Q50_CORREGIDOS	Rasters de caudales característicos corregidos y estadísticas asociadas.

Fuente: Elaboración propia

4.6 OFERTA HÍDRICA

La oferta hídrica bruta corresponde a la cantidad de agua generada naturalmente por el sistema hidrológico antes de aplicar reducciones asociadas a caudales ambientales, restricciones de aprovechamiento u otros criterios de disponibilidad. En el presente estudio se obtiene a partir de la variable “Q_total” generada por el modelo de balance hídrico, la cual integra la respuesta rápida y el flujo base y representa la salida superficial total producida mensualmente en cada celda del dominio. Debido a que el modelo fue formulado y calibrado a escala regional, su aplicación a cuencas de menor tamaño requiere corregir las diferencias de escala espacial identificadas en los rendimientos hídricos. Para ello, sobre Q_total se aplican factores de ajuste obtenidos a partir de la comparación entre los rendimientos medios multianuales calculados por el modelo y los rendimientos de referencia de las microcuencas definidas como abastecedoras en el POMCA del río Bogotá. De esta manera, se conserva la variabilidad temporal simulada por el balance hídrico, mientras que la magnitud de la oferta superficial se ajusta para mejorar su representatividad a la escala de las cuencas de interés.

A partir de la serie corregida se determina la oferta hídrica bruta mensual y anual para cada uno de los años del período 1995–2024, expresada tanto como lámina de agua en mm como en caudal medio equivalente en m^3/s. La disponibilidad de una serie continua de 30 años permite, además de obtener los valores medios mensuales y anuales multianuales, caracterizar la variabilidad interanual de la oferta, identificar años representativos de condiciones secas, medias y húmedas y evaluar la estacionalidad de los aportes. Esta información permite que la oferta hídrica no quede representada únicamente por un valor promedio, sino por su comportamiento temporal y por la variabilidad hidrológica observada durante todo el período de análisis.

Finalmente, a partir de las series mensuales de caudal se construyen las curvas de duración de caudales, mediante las cuales se relaciona cada magnitud de caudal con el porcentaje de tiempo en que dicho valor es igualado o excedido. Estas curvas permiten obtener caudales característicos asociados a diferentes niveles de permanencia, entre los cuales el

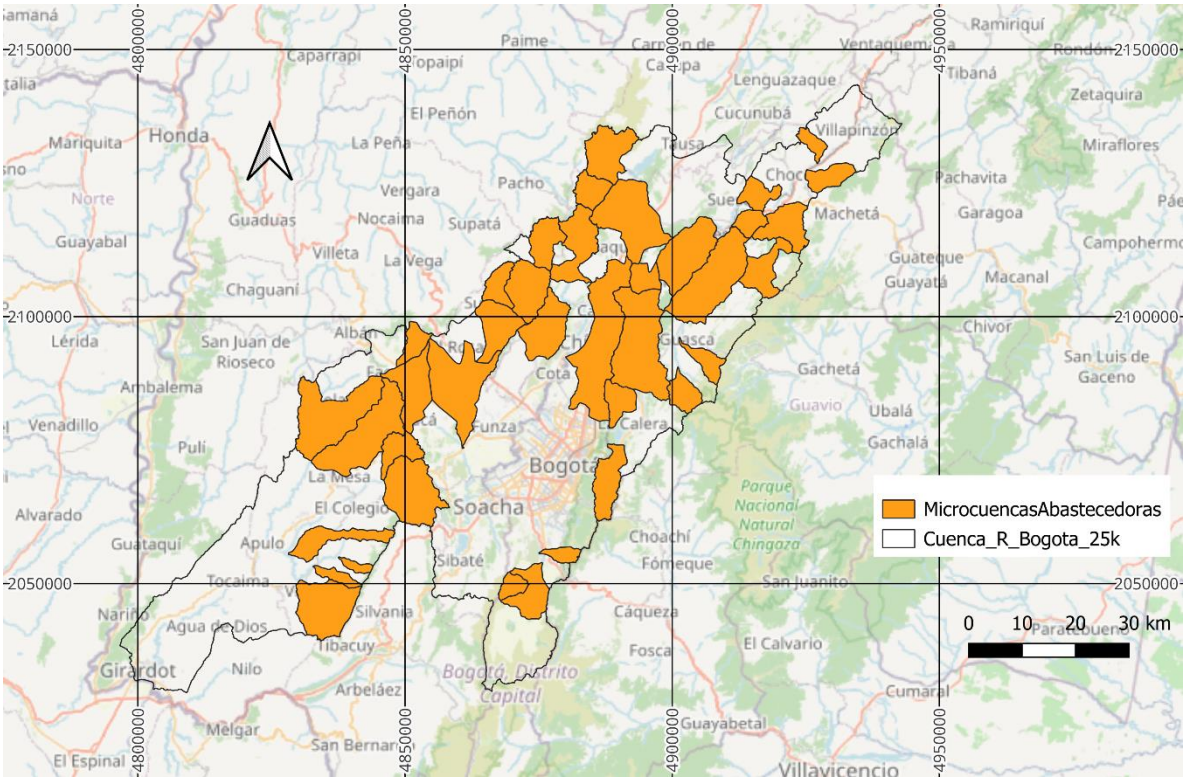
Q95, correspondiente al caudal igualado o excedido aproximadamente el 95 % del tiempo, resulta especialmente relevante para la evaluación de la capacidad de las fuentes de abastecimiento, por representar una condición de alta permanencia y, por tanto, asociada a períodos de baja disponibilidad hídrica.

.

4.6.1 OFERTA HÍDRICA MICROCUENCAS MICROABASTECEDORAS

Los resultados del balance hídrico se generan como rasters mensuales para el período 1995–2024, entre los cuales se encuentran las variables Qtotal, correspondiente a la oferta hídrica superficial, y Recarga, correspondiente a la recarga hídrica. Para obtener los resultados en cada microcuenca abastecedora (Ver Figura 20) se realiza la intersección de su polígono con los rasters mensuales y se calcula el valor medio espacial de las celdas contenidas total o parcialmente dentro de la cuenca, ponderando las celdas de borde por su área de intersección.

Figura 20. Microcuencas abastecedoras



Fuente: Elaboración propia

El valor medio de cada variable en la microcuenca se calcula mediante:

$$H_{cuenca} = \Sigma (H_{celda} \times A_{intersección}) / A_{cuenca} \quad (41)$$

donde Hcelda corresponde al valor del raster, expresado en mm; Aintersección es el área de cada celda incluida dentro de la microcuenca y Acuenca es el área total de esta.

En el caso de Qtotal, la lámina mensual obtenida en mm se transforma primero en volumen de agua mediante:

$$V = H \times A \times 1.000 \quad (42)$$

donde V es el volumen mensual en m³, H es la lámina mensual media en mm y A es el área de la microcuenca en km². La relación se basa en que una lámina de 1 mm distribuida sobre 1 km² equivale a 1.000 m³.

El caudal medio correspondiente a cada mes se obtiene dividiendo el volumen por el número de segundos del mes:

$$Q = V / (Ndías \times 86.400) \quad (43)$$

donde Q se expresa en m³/s y Ndías corresponde al número de días del mes considerado.

A partir del caudal y del área de la microcuenca se calcula el rendimiento hídrico:

$$R = Q \times 1.000 / A \quad (44)$$

donde R se expresa en L/s/km², Q en m³/s y A en km². De esta manera se generan, para cada microcuenca abastecedora, las series mensuales de oferta hídrica superficial correspondientes a los 360 meses comprendidos entre enero de 1995 y diciembre de 2024.

Para la recarga hídrica se emplea directamente el raster mensual de la variable Recarga generado por el balance. Para cada microcuenca se calcula igualmente el promedio espacial ponderado de las celdas comprendidas dentro de su polígono, obteniéndose una serie mensual expresada en mm/mes. En este caso los resultados se mantienen como lámina de recarga y no se transforman a caudal. A diferencia de la oferta hídrica superficial, a la recarga no se le aplica ningún factor de ajuste.

Determinación de los factores de corrección de la oferta hídrica superficial

Para cada microcuenca abastecedora se calcula inicialmente el rendimiento medio multianual correspondiente a la serie Qtotal del modelo para 1995–2024. Este valor se compara con el rendimiento hídrico medio multianual establecido para la misma microcuenca en el POMCA del río Bogotá. Los resultados originales evidencian diferencias de magnitud entre los rendimientos obtenidos con el balance y los valores de referencia del POMCA.

El factor de corrección se determina individualmente para cada microcuenca mediante:

$$Fcorr = RPOMCA / R \quad (45)$$

donde RPOMCA es el rendimiento medio multianual de referencia del POMCA y R es el rendimiento medio multianual obtenido a partir de Qtotal (ecuación 44).

La Tabla 60 muestra ejemplos del cálculo del factor de ajuste.

Tabla 60. Ejemplo de cálculo de los factores de corrección por microcuenca abastecedora

Microcuenca abstecedora	Área (km²)	R modelo (l/s/km²)	R_{POMCA} (l/s/km²)	Fcorr
2120-0304	104,5	11,98	8,78	0,733
2120-0604	49,9	6,59	7,34	1,114
2120-0207	50,4	10,67	18,23	1,709
2120-0605	17,9	7,96	21,24	2,668

Fuente: Elaboración propia

Los datos de área y rendimientos utilizados en estos ejemplos corresponden a los resultados obtenidos para las microcuencas abastecedoras y su comparación con la información del POMCA.

Un factor superior a 1 indica que el rendimiento obtenido con el balance es inferior al valor de referencia y que la oferta superficial debe incrementarse; un factor inferior a 1 indica que el balance produce un rendimiento superior al de referencia y, por tanto, debe reducirse. El factor calculado es único para cada microcuenca y se mantiene constante durante todo el período de análisis.

La serie mensual final de oferta hídrica se obtiene mediante:

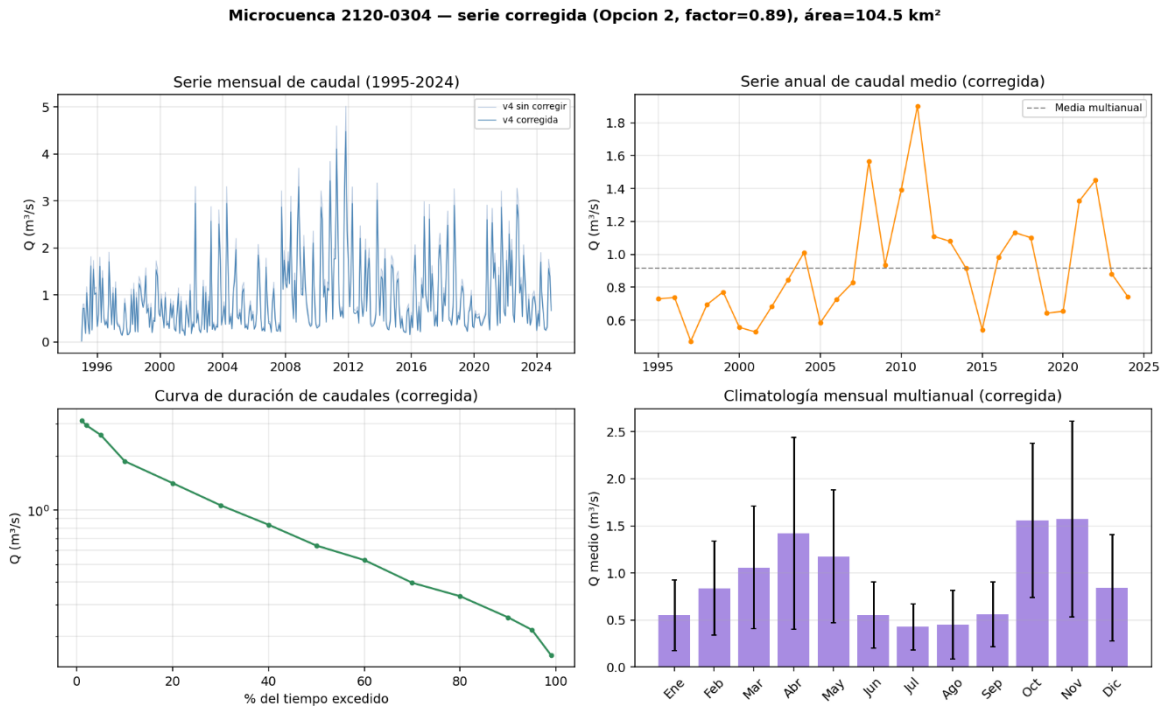
$$Qcorregido = Q_total \times Fcorr \quad (46)$$

Por tratarse de un factor constante para cada microcuenca, la corrección modifica la magnitud de los caudales, pero mantiene la variación temporal producida por el balance hídrico, incluyendo su estacionalidad, las diferencias entre años secos y húmedos y la secuencia de períodos de mayor y menor disponibilidad. Asimismo, por definición, el rendimiento medio multianual de la serie corregida coincide con el rendimiento medio multianual de referencia del POMCA utilizado para calcular el factor.

Los resultados finales comprenden, para cada microcuenca abastecedora, las series mensuales de oferta hídrica superficial corregida y las series mensuales de recarga hídrica para el período 1995–2024. Estas series, junto con los valores mensuales y anuales derivados de ellas, se presentan en el Anexo 5 (carpeta 06_OHST), donde se consolidan las series finales generadas para cada una de las unidades de análisis.

Como ejemplo de la información generada para cada microcuenca abastecedora se presenta la Figura 21.

Figura 21. Ejemplo información extraída del modelo de balance para cada microcuenca abastecedora



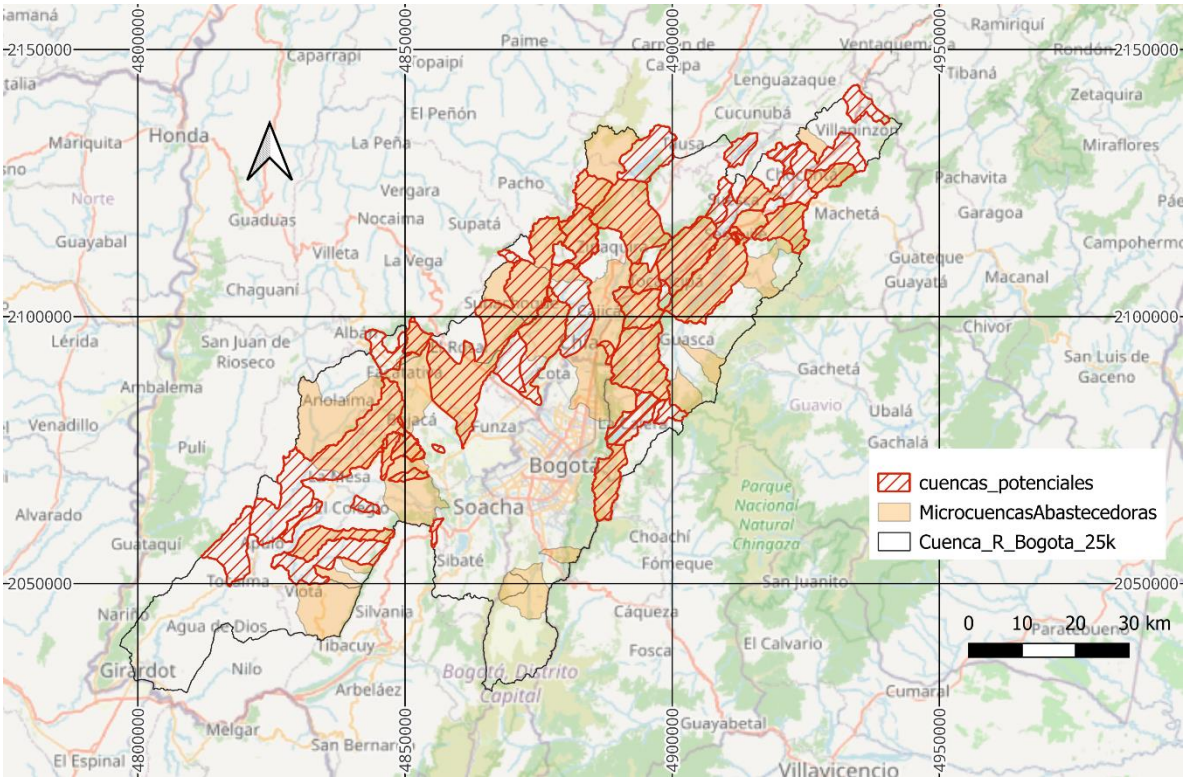
Fuente: Elaboración propia

4.6.2 OFERTA HÍDRICA CUENCAS POTENCIALES

La estimación de la oferta hídrica superficial total se realiza para las cuencas donde existen bocatomas o en las cuales, dada su ubicación topográfica, por encima de los centros urbanos o cabeceras municipales, es factible la captación y proyección de sistemas por gravedad. Estas cuencas son denominadas cuencas potenciales (Ver Figura 22).

Para estas cuencas se genera la información de series históricas, las cuales se incluyen en el anexo 5.

Figura 22. Cuencas potenciales y cuencas potenciales finales



Fuente: Elaboración propia

4.7 MODELOS HIDROLÓGICOS SOBRE SUBCUENCAS DE INTERÉS

Para las cuencas que cuentan con registros directos de caudal se dispone de una fuente adicional de información hidrológica que permite caracterizar la respuesta integrada de la cuenca frente a las condiciones climáticas. Sin embargo, es necesario diferenciar estos registros de los caudales correspondientes a una condición natural. Los datos medidos en las estaciones representan los caudales efectivamente disponibles en el cauce en el sitio y momento de medición y, por tanto, pueden incorporar los efectos acumulados de captaciones para abastecimiento, riego u otros usos, derivaciones, regulación mediante embalses o estructuras hidráulicas y, cuando existan, retornos provenientes de usos realizados aguas arriba. En consecuencia, estas series no corresponden necesariamente al caudal que se produciría únicamente como respuesta natural a la precipitación, evapotranspiración, características del suelo, cobertura y almacenamiento de la cuenca.

Esta consideración resulta especialmente importante para la estimación de la oferta hídrica natural. Cuando en una cuenca existen demandas y derivaciones aguas arriba y los registros no han sido restituidos a condición natural, el caudal observado tiende a representar únicamente el recurso remanente después de dichos aprovechamientos. Su utilización directa como referencia de oferta natural conduciría, en términos generales, a una subestimación de los aportes generados originalmente por la cuenca. Por esta razón, los caudales disponibles no se emplean en el presente análisis como sustituto de la oferta hídrica natural determinada mediante el balance hídrico regional, particularmente cuando

no se cuenta con información suficientemente completa sobre captaciones, retornos, regulación y demás intervenciones necesarias para realizar una restitución confiable de las series.

No obstante, los registros de caudal disponible conservan un valor hidrológico y operativo importante. Al representar las condiciones que efectivamente se presentan en el cauce una vez consideradas las intervenciones existentes aguas arriba, resultan particularmente útiles para el dimensionamiento y verificación de obras hidráulicas, la evaluación de condiciones actuales de operación y el análisis del recurso remanente que alcanza determinados sectores de la red de drenaje. Asimismo, permiten evaluar la respuesta temporal de la cuenca y establecer relaciones entre la variabilidad climática y los caudales observados, siempre que sus resultados se interpreten como caudales disponibles y no como una reconstrucción de la condición natural.

Las series originales de caudal se encuentran disponibles a escala diaria. Sin embargo, las variables climatológicas empleadas para la modelación hidrológica, principalmente precipitación y evapotranspiración potencial, fueron previamente consolidadas a escala mensual para el período 1995–2024. Con el fin de mantener consistencia temporal entre las variables de entrada y la variable de respuesta, los registros diarios de caudal se agregan a valores medios mensuales. De esta forma, para cada cuenca se dispone de series mensuales coincidentes de precipitación, evapotranspiración potencial y caudal disponible, adecuadas para la aplicación de un modelo lluvia–escorrentía de paso mensual.

Antes de la modelación se realiza la revisión de consistencia, continuidad y representatividad de las series de caudal, descartando aquellas cuencas cuya información no permita establecer una relación hidrológicamente confiable entre las variables climáticas y los caudales registrados. Para las cuencas que superan estos criterios se aplica el modelo conceptual mensual GR2M, utilizando como variables de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial y como variable de contraste el caudal medio mensual disponible. El propósito de esta modelación es reproducir y caracterizar el comportamiento hidrológico observado en las cuencas con información directa, generar series continuas cuando las condiciones de los registros lo permitan y disponer de una herramienta complementaria para el análisis de caudales disponibles y del potencial hídrico remanente, sin interpretar sus resultados como una restitución de la oferta hídrica a condición natural.

4.7.1 MODELO GR2M

Al igual que los demás modelos de la familia GR, GR2M emplea como variables de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial mensuales para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Para ello, representa de manera conceptual los procesos dominantes del ciclo hidrológico, permitiendo estimar la evolución de la escorrentía a partir del balance entre los aportes de agua y las pérdidas por evapotranspiración.

La principal diferencia de GR2M respecto a otros modelos de la familia GR es la sencillez de su estructura y el reducido número de parámetros que requiere para su calibración. El modelo está conformado por un reservorio de producción, que representa el almacenamiento de agua en el suelo y la generación de los excedentes de escorrentía, y

un reservorio de enrutamiento con una capacidad fija de 60 mm, encargado de regular el tránsito del agua hasta la salida de la cuenca. El comportamiento de ambos reservorios depende únicamente de dos parámetros calibrables: **X1**, que define la capacidad máxima del reservorio de producción, y **X2**, asociado al intercambio de agua en el reservorio de enrutamiento.

Gracias a esta estructura, GR2M se considera uno de los modelos conceptuales mensuales más parsimoniosos desarrollados para la simulación hidrológica. El hecho de contar con solo dos parámetros reduce considerablemente el esfuerzo de calibración y disminuye el riesgo de sobreparametrización, aspecto especialmente importante cuando la información hidrometeorológica disponible es limitada. Esta característica ha favorecido su aplicación en cuencas con registros de caudal escasos o de corta duración. Además, sus bajos requerimientos computacionales hacen posible realizar simulaciones continuas de largo plazo y evaluar diferentes escenarios hidrológicos de manera eficiente.

Sin embargo, la simplicidad del modelo también supone ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta durante su aplicación. Al trabajar con una escala temporal mensual, GR2M no está diseñado para reproducir la dinámica de eventos individuales de lluvia ni para estimar caudales máximos asociados a tormentas de corta duración. Asimismo, al representar la cuenca como una unidad espacial homogénea, no incorpora explícitamente la variabilidad espacial de variables como la precipitación, las propiedades del suelo, la cobertura vegetal o la topografía. Por esta razón, su uso resulta más apropiado en estudios enfocados en la evaluación de la oferta hídrica, el balance hídrico y la variabilidad de los recursos hídricos a largo plazo que en aplicaciones relacionadas con el diseño hidráulico o el pronóstico de crecientes.

En términos generales, GR2M ofrece una alternativa robusta para la modelación hidrológica continua a escala mensual, combinando una estructura sencilla con un desempeño satisfactorio en la reproducción del comportamiento medio de la escorrentía. Estas cualidades explican que continúe siendo ampliamente utilizado en estudios de planificación y gestión de los recursos hídricos, así como en investigaciones orientadas a evaluar los efectos de la variabilidad climática y del cambio climático sobre la disponibilidad de agua.

Análisis de consistencia de la información

Como paso previo a la modelación hidrológica se realizó un análisis de consistencia de la información de precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración real (ETR) zonal y caudal (Q) para el conjunto de estaciones con cuenca aferente delimitada en el proyecto (Informe_consistencia_caudales_balance_hidrico_1995_2024.docx). A partir de dicho análisis se seleccionaron las 20 cuencas con mejor cierre del balance hídrico multianual y comportamiento hidrológico más representativo, las cuales son las que se emplean en la modelación con el paquete airGR descrita en las secciones siguientes.

La Tabla 61 presenta, para cada una de las 20 cuencas seleccionadas, el área aferente y los indicadores de cierre del balance hídrico multianual (1995–2024): la razón entre el residuo del balance y la precipitación (Error/P), la razón escorrentía/precipitación (Q/P), la razón evapotranspiración real/precipitación (ETR/P) y el rendimiento hídrico específico.

Tabla 61. Cuencas seleccionadas para la modelación hidrológica — indicadores de cierre del balance hídrico (1995–2024)

Código	Área (km²)	Error/P (%)	Q/P	ETR/P	Rendimiento (l/s/km²)
2120882	5377.34	0.1	0.25	0.75	8.2
2120914	18.22	-0.2	0.33	0.67	25.2
2120785	351.72	0.2	0.22	0.78	7.0
2120920	5894.69	-0.3	0.26	0.74	8.8
2401723	204.15	-0.4	0.24	0.77	6.9
2120719	266.73	0.5	0.26	0.74	8.2
2120934	30.42	0.8	0.26	0.73	8.5
2120788	298.48	1.0	0.22	0.77	9.8
2120923	0.72	1.1	0.18	0.81	15.8
2120886	6.88	-1.4	0.34	0.67	15.8
2120889	70.80	1.8	0.32	0.66	17.1
2401756	38.67	-1.9	0.26	0.76	22.1
2401715	175.12	2.0	0.22	0.76	5.9
2120735	163.10	2.7	0.22	0.75	9.1
2120879	7.63	2.9	0.18	0.79	5.4
2120929	18.24	-3.7	0.37	0.67	20.1
2120930	39.17	-4.0	0.33	0.71	10.9

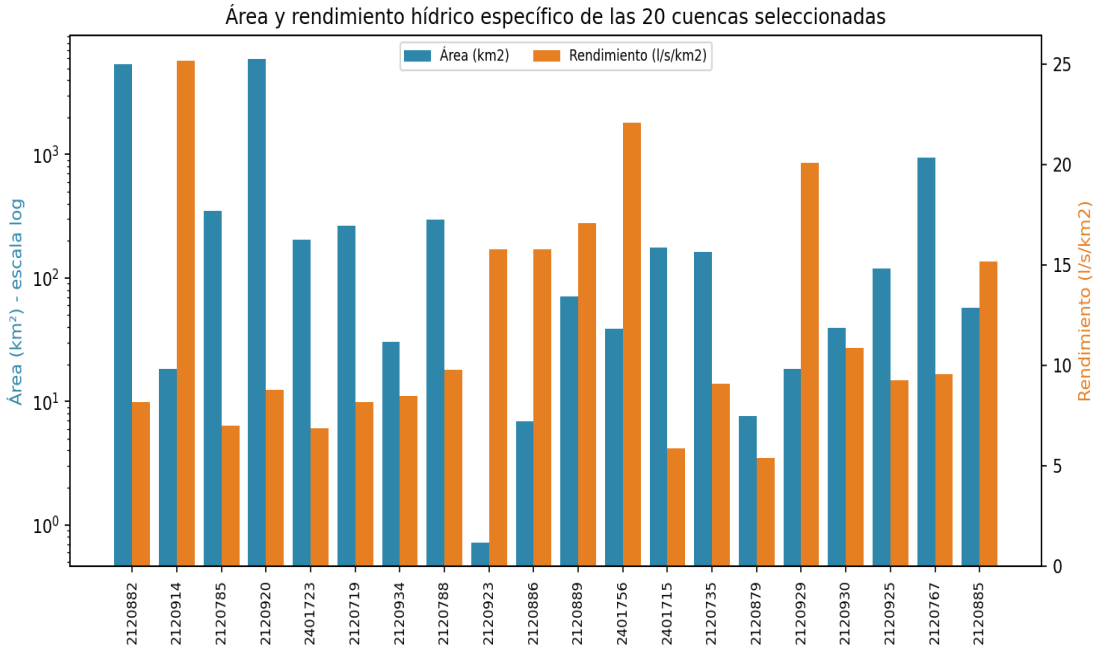
Código	Área (km²)	Error/P (%)	Q/P	ETR/P	Rendimiento (l/s/km²)
2120925	120.14	4.3	0.22	0.74	9.3
2120767	943.07	-5.2	0.30	0.75	9.6
2120885	57.28	5.2	0.28	0.67	15.2

Fuente: Elaboración propia

Estos cuatro indicadores permiten evaluar qué tan razonable es el cierre del balance hídrico en cada cuenca: el Error/P es el residuo del balance (P − ETR − Q) expresado como porcentaje de la precipitación, y mide directamente qué tan bien cierra el balance, considerándose aceptable cuando su valor absoluto no supera el 10%; el Q/P es el coeficiente de escorrentía, es decir la fracción de la lluvia que sale como caudal, con un rango físicamente razonable entre 0.05 y 0.60 (un valor mayor a 1 es imposible y uno cercano a 0 sugiere caudal subestimado o área sobredimensionada); el ETR/P es la fracción de la lluvia que retorna a la atmósfera por evapotranspiración, que junto con el Q/P debe aproximarse a 1 al restar el residuo, y en cuencas frías y húmedas como las de la sabana de Cundinamarca suele ser alto (entre 0.66 y 0.81 en las cuencas seleccionadas); y el rendimiento hídrico específico es el caudal medio dividido entre el área de la cuenca (en l/s/km²), una medida comparable entre cuencas de distinto tamaño que se considera razonable entre 2 y 35 l/s/km², de modo que valores muy bajos apuntan a caudal subestimado o área sobredimensionada y valores muy altos a área subestimada o error de escala.

Por su parte, la *Figura 23*, para las 20 cuencas seleccionadas, presenta dos barras por estación: el área aferente (barras azules, en escala logarítmica dado que va desde 0.72 km² hasta 5,894.69 km², es decir más de tres órdenes de magnitud de diferencia) y el rendimiento hídrico específico (barras naranjas, en l/s/km²), ambas ordenadas según el mismo orden de la Tabla 61 (por |Error/P| ascendente). Su propósito es mostrar visualmente que el rendimiento no depende del tamaño de la cuenca: las cuencas más grandes (2120882 y 2120920, ambas de más de 5,000 km²) tienen rendimientos moderados (8.2–8.8 l/s/km²), mientras que algunas de las cuencas más pequeñas (2120914, con solo 18.22 km², y 2120929, con 18.24 km²) alcanzan los rendimientos más altos del grupo (25.2 y 20.1 l/s/km² respectivamente). Esto es coherente con lo esperado hidrológicamente: el rendimiento específico refleja más bien las condiciones climáticas y de cobertura de cada cuenca (mayor precipitación, menor evapotranspiración, suelos con menor capacidad de retención) que su extensión, por lo que la figura sirve como verificación visual rápida de que las 20 cuencas seleccionadas no presentan una relación espuria entre área y rendimiento que delatara un problema sistemático de delimitación.

Figura 23. Área y rendimiento hídrico específico de las 20 cuencas seleccionadas para la modelación.



Fuente: Elaboración propia

Implementación modelo GR2M

La modelación hidrológica de las cuencas seleccionadas se realiza mediante un programa en lenguaje R que utiliza el paquete airGR, el cual implementa la familia de modelos hidrológicos conceptuales GR (Génie Rural) desarrollados por INRAE. Para este proyecto se emplea el modelo mensual de dos parámetros GR2M (función RunModel_GR2M de airGR), adecuado para la escala mensual en la que están disponibles las series de precipitación, evapotranspiración y caudal de las estaciones.

- Datos de entrada

Precipitación mensual por cuenca (P_estaciones.csv), 1995–2024.

Evapotranspiración potencial mensual por cuenca (ETP_estaciones.csv), 1995–2024.

Caudal medio mensual observado por estación (Qmed_estaciones.csv), usado como referencia para la calibración.

Área de la cuenca aferente a cada estación, necesaria para convertir el caudal entre m³/s y lámina en mm.

- Flujo del programa

Se estandarizan las series de P, ETP y Q al período común 1995–2024 (360 meses) y se identifican las cuencas "modelables": con área válida, series completas de P y ETP, y al menos 12 meses de caudal observado en el período de calibración.

Para cada cuenca modelable se construyen los objetos de entrada de airGR (CreateInputsModel) con las series de precipitación y evapotranspiración potencial en mm.

Se definen el período de calibración (enero 1995 – diciembre 2005) y el de validación (enero 2006 – diciembre 2024) mediante CreateRunOptions.

La función objetivo de calibración es el índice de Kling-Gupta (KGE), calculado en lámina (mm) sobre el período de calibración, mediante CreateInputsCrit y ErrorCrit_KGE.

Los dos parámetros libres del modelo GR2M —X1, capacidad del reservorio de producción (mm), y X2, coeficiente de intercambio subterráneo (adimensional)— se calibran automáticamente con el algoritmo de Michel (Calibration_Michel), que combina una búsqueda por rejilla con optimización local tipo Nelder-Mead.

Con los parámetros óptimos se corre el modelo (RunModel_GR2M) sobre todo el período 1995–2024 para obtener el caudal simulado mensual (Qsim), expresado en mm y en m³/s.

Se calculan las métricas de desempeño (KGE, RMSE, MAE, sesgo) para calibración y validación, y se construye la serie de caudal "completado": conserva el caudal observado donde existe y rellena los vacíos con el caudal simulado por GR2M.

El programa se ejecuta para el conjunto de cuencas modelables del proyecto y, a partir de sus resultados, se extrajo la información de las 20 cuencas seleccionadas en la sección 1, organizándola en la carpeta cuencas seleccionadas: para cada estación quedaron los datos de entrada y la serie completa (P, ETP, Qobs, Qsim y Qcompleto), los parámetros calibrados, las métricas de calibración/validación y una figura de la calibración.

Calibración modelo hidrológico

De las 20 cuencas seleccionadas, 18 cuentan con calibración del modelo GR2M; en las estaciones 2120923 y 2401756 el registro de caudal disponible en el período de calibración (1995–2005) resultó insuficiente (menos de 12 meses observados), por lo que no se dispone de parámetros GR2M para estas dos y su información se limita al caudal observado disponible. La Tabla 62 presenta, para las 20 cuencas, el área, los parámetros calibrados X1 y X2, y el KGE de calibración obtenido en lámina (mm).

Tabla 62. Parámetros calibrados del modelo GR2M por cuenca

Código	Área (km²)	X1 (mm)	X2 (–)	KGE calibración
2120882	5377.34	618.15	1.164	0.601

Código	Área (km²)	X1 (mm)	X2 (–)	KGE calibración
2120914	18.22	57.23	1.337	0.613
2120785	351.72	1087.37	0.899	0.093
2120920	5894.69	608.25	1.137	0.133
2401723	204.15	59.02	0.874	0.493
2120719	266.73	65.16	1.025	0.731
2120934	30.42	102.39	1.142	0.339
2120788	298.48	117.57	1.365	0.475
2120923	0.72	—	—	—
2120886	6.88	25.53	0.897	0.339
2120889	70.80	17.95	0.460	0.167
2401756	38.67	—	—	—
2401715	175.12	170.72	1.147	0.657
2120735	163.10	67.36	1.030	0.569
2120879	7.63	171.45	0.901	0.328
2120929	18.24	226.53	1.453	0.622
2120930	39.17	60.34	0.995	0.253
2120925	120.14	154.47	1.183	0.773
2120767	943.07	273.14	1.327	0.283

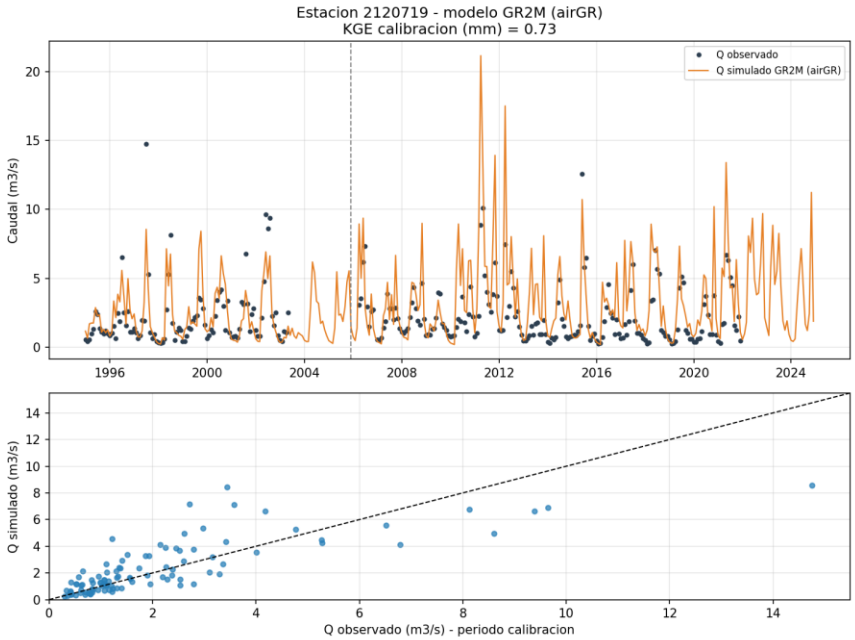
Código	Área (km²)	X1 (mm)	X2 (–)	KGE calibración
2120885	57.28	530.84	1.436	0.582

X1: capacidad del reservorio de producción (mm). X2: coeficiente de intercambio subterráneo (adimensional). KGE calculado en lámina mensual (mm) sobre el período de calibración 1995–2005.

Fuente: Elaboración propia

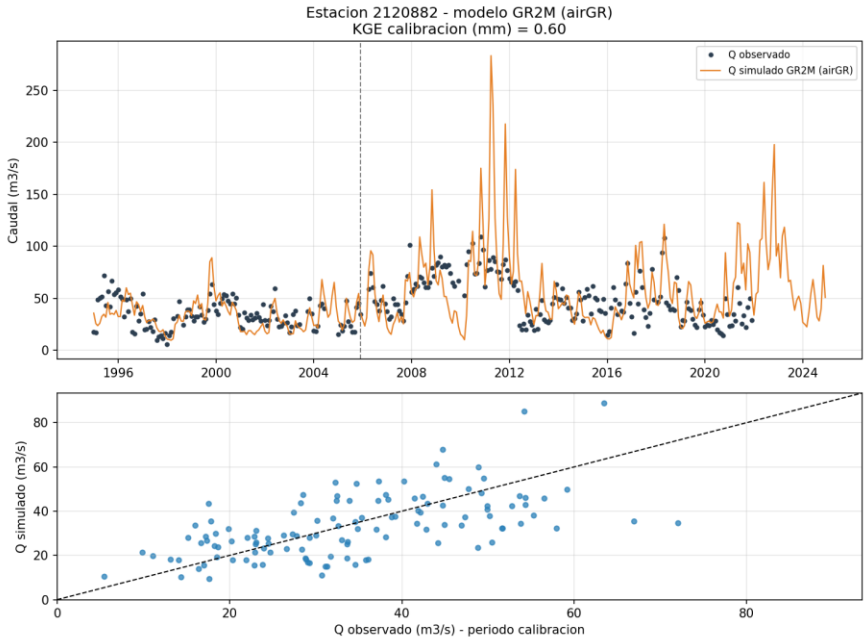
A manera de ejemplo, la Figura 24 a Figura 27 muestran, para cuatro cuencas representativas del rango de ajuste obtenido, la serie de caudal observado y simulado (panel superior; la línea vertical separa calibración y validación) y la dispersión observado–simulado en calibración (panel inferior). El conjunto completo de las 20 figuras, una por cuenca, está en la carpeta cuencas seleccionadas (anexo 07_modelos GR2M).

Figura 24. Estación 2120719 — cuenca con calibración aceptada (KGE ≥ 0.5), ajuste representativo del grupo mejor calibrado.



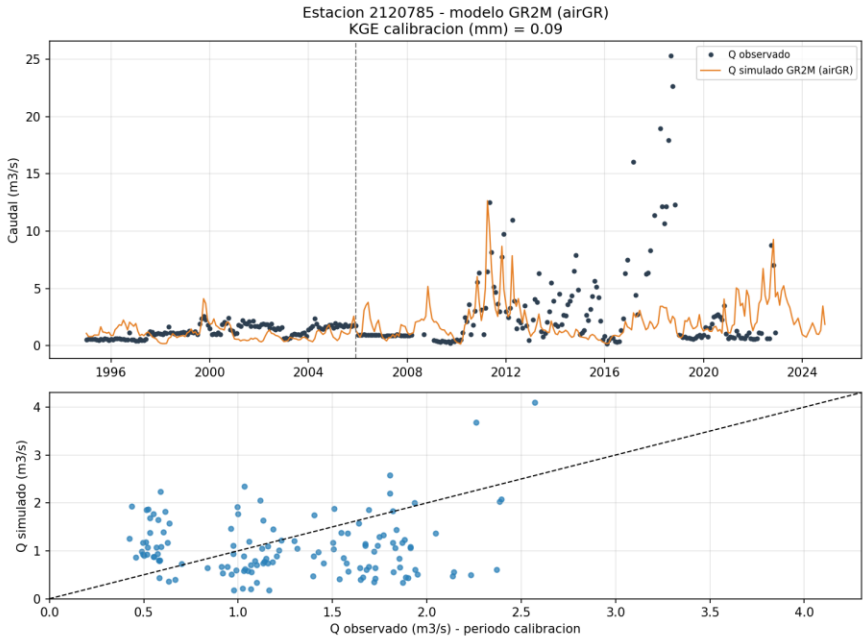
Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Estación 2120882 — cuenca de mayor área (5,377 km²) con calibración aceptada (KGE ≥ 0.5).



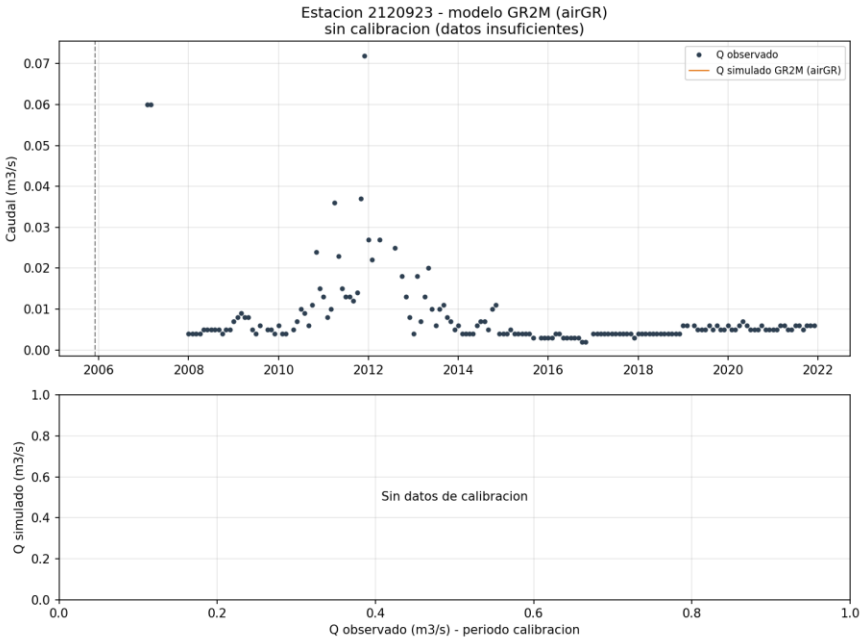
Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Estación 2120785 — cuenca con calibración de baja bondad de ajuste (KGE < 0.5); aun así el modelo se ejecuta y se reportan sus parámetros



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Estación 2120923 — cuenca sin calibración por longitud insuficiente del registro de caudal en el período de calibración



Fuente: Elaboración propia

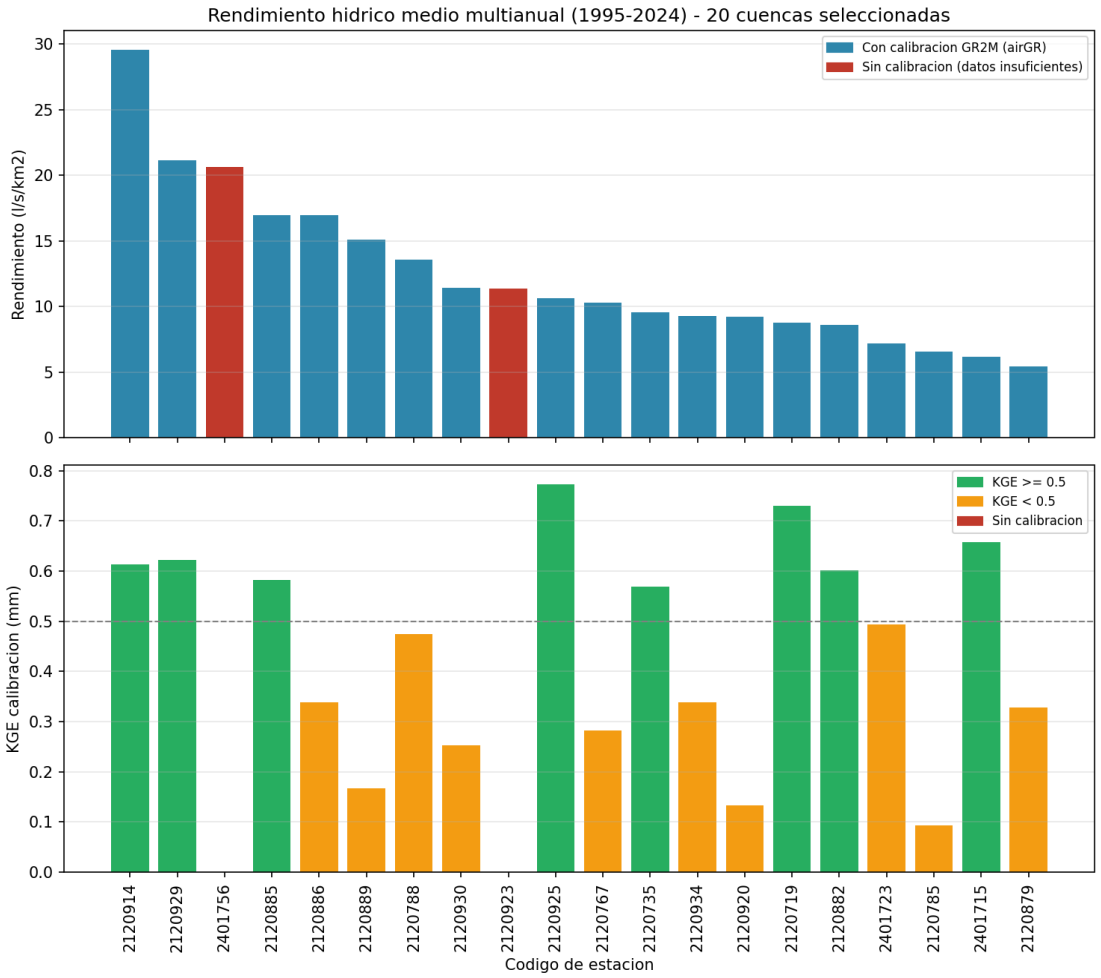
De las 18 cuencas con calibración GR2M, el KGE de calibración va de 0.093 (2120785) a 0.773 (2120925), con una mediana de aproximadamente 0.45 y solo 8 de las 18 (44%) alcanzando el umbral convencional de "aceptable" (KGE ≥ 0.5) que se usa como referencia en la literatura de modelación hidrológica. Este desempeño moderado a bajo, más que ser un defecto puntual de algunas estaciones, refleja una combinación de factores estructurales del ejercicio: primero, el GR2M es un modelo conceptual muy parsimonioso (solo dos parámetros, X1 y X2), diseñado para capturar la dinámica general del balance mensual pero con poca capacidad para representar procesos locales complejos como flujo subsuperficial rápido, efectos de karst o heterogeneidad de cobertura y suelo dentro de la cuenca; segundo, los caudales observados usados como referencia no están restituidos a régimen natural (así lo advierte el propio informe de consistencia), por lo que en cuencas con captaciones para acueducto, trasvases o embalses aguas arriba de la estación, el hidrograma observado mezcla la señal lluvia-escorrentía con extracciones y regulaciones antrópicas que un modelo de balance natural no puede reproducir, lo cual es especialmente relevante en un proyecto centrado precisamente en acueductos; tercero, el período de calibración (1995-2005) quedó, en varias estaciones, con muy pocos meses de caudal observado disponible (entre 55 y 132 de los 132 posibles), lo que limita la identificabilidad de los parámetros y hace la calibración sensible a datos puntuales o atípicos; y cuarto, el rango de áreas de las cuencas seleccionadas es muy amplio (0.72 a 5,894 km²), y tanto las cuencas muy pequeñas (respuesta rápida que un paso mensual diluye) como las muy grandes (heterogeneidad climática interna mal representada por una sola serie de P y ETP zonal) tienden a ajustar peor que las de tamaño intermedio. A esto se suma que los criterios con los que se seleccionaron estas 20 cuencas (cierre del balance Error/P, Q/P, ETR/P y

rendimiento) evalúan consistencia del balance hídrico, no la facilidad de calibración del modelo lluvia-escorrentía. Además, el desempeño en validación (2006-2024) es, en varias estaciones, notablemente peor o incluso negativo respecto a calibración (por ejemplo 2120767 pasa de KGE=0.28 en calibración a −1.60 en validación, 2401715 de 0.66 a −0.85, y 2120934 de 0.34 a −0.52), lo que indica que el ajuste no es estable en el tiempo y sugiere cambios de régimen (posibles nuevas captaciones, cambios de cobertura o de operación de estructuras) que el modelo, calibrado con un único juego de parámetros fijos, no logra capturar.

En este mismo sentido, la Figura 28 incluye los rendimientos de la Tabla 63 junto con la confiabilidad de cada estimación de la Tabla 62: presentando para las 20 cuencas seleccionadas el rendimiento hídrico multianual (panel superior) y el KGE de calibración correspondiente (panel inferior).

En esta Figura que los rendimientos hídricos obtenidos no son igualmente confiables entre sí. Al ordenar las cuencas de mayor a menor rendimiento y superponer el KGE de calibración en el mismo orden, se observa que la magnitud del rendimiento no guarda relación con la calidad del ajuste del modelo: la cuenca con el rendimiento más alto (2120914, cerca de 29.6 l/s/km²) proviene de una calibración aceptable (KGE ≈ 0.61), pero cuencas con rendimientos intermedios, como 2120785 (≈6.5 l/s/km²), se sustentan en una calibración muy pobre (KGE ≈ 0.09), e incluso dos de las 20 cuencas (2120923 y 2401756) no cuentan con calibración GR2M y su rendimiento proviene únicamente del caudal observado disponible. Este contraste confirma que, dentro del grupo de 20 cuencas seleccionadas por su cierre del balance hídrico, apenas 8 alcanzan el umbral de KGE ≥ 0.5 considerado aceptable, mientras que el resto exhibe ajustes moderados a bajos o carece de calibración; por lo tanto, los valores de rendimiento de las cuencas con barra verde (KGE ≥ 0.5) pueden tomarse con mayor confianza como estimación de la oferta hídrica multianual, mientras que los de las cuencas con barra naranja (KGE < 0.5) o sin calibración deben interpretarse como una aproximación de orden de magnitud, sujeta a las limitaciones estructurales del modelo y de la información de caudal discutidas previamente (paso mensual, caudales no naturalizados, períodos cortos de calibración y amplio rango de tamaños de cuenca).

Figura *28. Rendimiento hídrico multianual y KGE de calibración de las 20 cuencas seleccionadas, ordenadas de mayor a menor rendimiento.*



Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, los resultados de GR2M para estas cuencas deben tratarse como una estimación de orden de magnitud del comportamiento hidrológico mensual y no como una herramienta de pronóstico preciso: son razonablemente útiles para completar vacíos puntuales de la serie observada y para estimar la oferta hídrica media multianual (donde los errores de meses individuales tienden a compensarse), pero no deberían usarse, sin advertencias adicionales, para sustentar decisiones que dependan de la magnitud exacta de caudales mensuales o de eventos extremos (concesiones, caudal ecológico, diseño de estructuras de captación), particularmente en las 10 cuencas con KGE de calibración por debajo de 0.5 y en aquellas con validación negativa. Tampoco es recomendable transferir o regionalizar los parámetros X1 y X2 de estas cuencas hacia cuencas vecinas sin aforo, dado que su identificabilidad es débil. Para las dos cuencas sin calibración (2120923 y

2401756), simplemente no existe información de GR2M y cualquier análisis de oferta debe basarse únicamente en su caudal observado, con las limitaciones de cobertura temporal que eso implica.

Resultados calibración

Para cada cuenca modelada, el programa entrega: la serie mensual completa 1995–2024 de precipitación, evapotranspiración potencial, caudal observado y caudal simulado por GR2M (archivo 01_datos_entrada_y_series_GR2M_<código>.csv); los parámetros calibrados X1 y X2 (archivo 02_parametros_calibrados_GR2M_<código>.csv); las métricas de calibración y validación —KGE, RMSE, MAE y sesgo, en m³/s y en mm— (archivo 03_metricas_calibracion_validacion_<código>.csv); y la figura de calibración/validación (archivo 04_figura_calibracion_<código>.png). Todos estos archivos, para las 20 cuencas seleccionadas, están en el anexo 6.

La Tabla 63 resume el caudal medio multianual (1995–2024) y el rendimiento hídrico específico de cada cuenca, calculados a partir de la serie de caudal completada (observado donde existe, simulado por GR2M en los vacíos).

Tabla 63. Caudal medio multianual y rendimiento hídrico por cuenca seleccionada (serie completada 1995–2024)

Código	Área (km²)	Q medio multianual (m³/s)	Q medio multianual (mm/año)	Rendimiento (l/s/km²)
2120882	5377.34	46.175	271.2	8.59
2120914	18.22	0.539	932.8	29.57
2120785	351.72	2.300	206.8	6.54
2120920	5894.69	54.278	290.7	9.21
2401723	204.15	1.470	227.6	7.20
2120719	266.73	2.345	278.4	8.79
2120934	30.42	0.282	292.7	9.27
2120788	298.48	4.056	429.7	13.59
2120923	0.72	0.008	358.6	11.40

Código	Área (km²)	Q medio multianual (m³/s)	Q medio multianual (mm/año)	Rendimiento (l/s/km²)
2120886	6.88	0.117	535.6	16.96
2120889	70.80	1.068	475.6	15.08
2401756	38.67	0.799	654.0	20.66
2401715	175.12	1.082	195.3	6.18
2120735	163.10	1.557	301.8	9.55
2120879	7.63	0.041	171.2	5.42
2120929	18.24	0.386	667.7	21.18
2120930	39.17	0.448	361.1	11.44
2120925	120.14	1.275	335.4	10.61
2120767	943.07	9.734	326.0	10.32
2120885	57.28	0.972	535.3	16.96

Fuente: Elaboración propia

En las estaciones 2120923 y 2401756, sin calibración GR2M, los valores corresponden únicamente al caudal observado disponible (160 y 139 meses de 360, respectivamente), por lo que su representatividad multianual es menor que la del resto de las cuencas.

5 ANALISIS DE OFERTA – DEMANDA

5.1 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA DEMANDA HÍDRICA REGIONAL

Para garantizar la viabilidad y sostenibilidad técnica del proyecto del Acueducto Regional de la Sabana, es indispensable comprender a fondo cómo se configuran y evolucionan las necesidades de agua en su territorio de influencia. Por ello, este capítulo tiene como propósito fundamental definir el alcance de la caracterización cualitativa de la demanda de agua en la zona de influencia para las diferentes alternativas del proyecto, permitiendo identificar con claridad las presiones sobre el recurso y los requerimientos de los 16 municipios involucrados.

Para lograr un análisis técnicamente riguroso y articulado con la normativa vigente, se adoptan los lineamientos conceptuales del Estudio Nacional del Agua (ENA) y de los Estudios Regionales del Agua (ERA) elaborados por la CAR, los cuales aportan la visión macro de la gestión del recurso hídrico en el país y en el departamento. Esta perspectiva se complementa directamente con las determinantes ambientales del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del Río Bogotá, asegurando que el proyecto respite la dinámica ecológica de las subcuencas aportantes. Finalmente, para aterrizar estas directrices a la realidad de cada territorio, se incorpora la información contenida en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT, PBOT o EOT) y los Planes de Desarrollo Municipal (PDM) de los 16 municipios.

5.1.1 DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN HIDRICO-ADMINISTRATIVA

La viabilidad técnica y operativa del Acueducto Regional de la Sabana requiere superar la tradicional división político-administrativa de los municipios y adoptar un enfoque de ordenamiento en torno al agua. Para lograrlo, los 16 municipios que integran el área de influencia del proyecto se clasifican y agrupan estructuralmente a partir de las subcuencas hidrográficas delimitadas por el POMCA del Río Bogotá. Esta sectorización permite entender el territorio no como un conjunto de entidades aisladas, sino como un sistema de interdependencias hídricas donde las acciones aguas arriba condicionan directamente la disponibilidad y calidad del recurso aguas abajo.

Bajo este marco técnico, el territorio se organiza en cinco grandes nodos o grupos subregionales basados en sus subcuencas aportantes directas:

5.1.1.1 SUBCUENCAS ALTA BOGOTÁ, RÍO NEUSA Y EMBALSE TOMINÉ (SECTOR DE CABECERA)

Integrado principalmente por Sesquilé, Gachancipá, Tocancipá y Sopó. Estos municipios representan las zonas de regulación y almacenamiento estratégico, donde se localizan infraestructuras clave de amortiguación y abastecimiento regional (embalses de Tominé y Sisga, río Neusa). Según el POMCA, las subcuencas de este nodo presentan demandas relativamente moderadas pero con alta importancia como fuentes de regulación: Río Alto Bogotá (0,722 m³/s), Río Neusa (1,084 m³/s), Embalse Tominé (0,281 m³/s) y Embalse del Sisga (0,081 m³/s). Su rol es de soporte y transferencia hacia los sectores de mayor demanda aguas abajo.

5.1.1.2 SUBCUENCAS DE LOS RÍOS FRÍO Y CHICÚ

Agrupa a los municipios de Tabio, Cajicá, Chía y Cota. Esta zona se caracteriza por una alta presión de crecimiento residencial y de servicios, cuyos cauces actúan como ejes

articuladores de recarga y drenaje en la planicie norte de la Sabana. El POMCA reporta para el río Frío una demanda de 0,452 m³/s y para el río Chicú de 0,146 m³/s, ambas con Índice de Uso del Agua (IUA) en rangos medio a alto, reflejo de la concentración de la demanda doméstica asociada a la expansión inmobiliaria de la Sabana Norte.

5.1.1.3 SUBCUENCA DEL RÍO TEUSACÁ

En donde destaca de manera prioritaria el municipio de La Calera (con sinergias en Sopó), zona de vital importancia por su oferta hídrica y su rol en la interconexión con el sistema de abastecimiento perimetral de la región. El POMCA asigna a la subcuenca del río Teusacá una demanda de 0,281 m³/s, con un IUA clasificado como Bajo, lo que denota una presión relativa menor pero una función estratégica como área de protección y captación.

5.1.1.4 SUBCUENCAS DE LOS RÍOS SUBACHOQUE Y BALSILLAS

Vincula a los municipios de Facatativá, Madrid, Funza, Mosquera y Bojacá. Este grupo concentra una de las mayores demandas de agua de uso industrial y agropecuario (distritos de riego y cultivos de flores), representando un escenario de alta exigencia hídrica sobre el sistema del Río Bogotá. La subcuenca del río Balsillas presenta una demanda de 3,018 m³/s con un IUA Muy Alto (0,533), la segunda más elevada de toda la cuenca, evidenciando la fuerte presión agroindustrial del occidente de la Sabana.

5.1.1.5 SUBCUENCAS DE LOS RÍOS APULO Y CALANDAIMA (SECTOR BAJO BOGOTÁ)

Agrupa a los municipios de La Mesa y Anapoima, los cuales, por su condición geográfica de transición hacia el valle del Magdalena, presentan dinámicas térmicas y de demanda turística diferenciadas, caracterizadas por una marcada vulnerabilidad al desabastecimiento en temporadas secas. El POMCA reporta para el río Apulo una demanda de 1,968 m³/s (IUA Alto, 0,371) y para el río Calandaima de 0,337 m³/s (IUA Medio, 0,118), siendo el río Bajo Bogotá adyacente (1,556 m³/s) el principal colector de este sector.

Esta clasificación y agrupación resulta fundamental, ya que proporciona la justificación técnica indispensable para identificar y analizar los aportes y las presiones acumuladas sobre las microcuencas abastecedoras compartidas. Al reconocer qué municipios comparten la misma unidad hidrográfica, es posible comprender las dinámicas de uso, anticipar los escenarios de conflicto por el agua y vislumbrar esquemas de gobernanza regional viables para el proyecto.

En la *Tabla 55* se detallan por cada subcuenca, los valores de Demanda Total en m³/s, el valor del IUA y su respectivo rango y, teniendo en cuenta los municipios de interés para este proyecto, el nodo al cual está asociado dicha subcuenca, entendiendo cada nodo como una agrupación de municipios que comparten una o varias subcuencas. Así mismo en la *Figura 20* y *Figura 21* se puede visualizar los valores de dicha demanda para las subcuencas de interés del proyecto y su disposición geográfica en comparación con la ubicación de los municipios dentro de la Sabana de Bogotá.

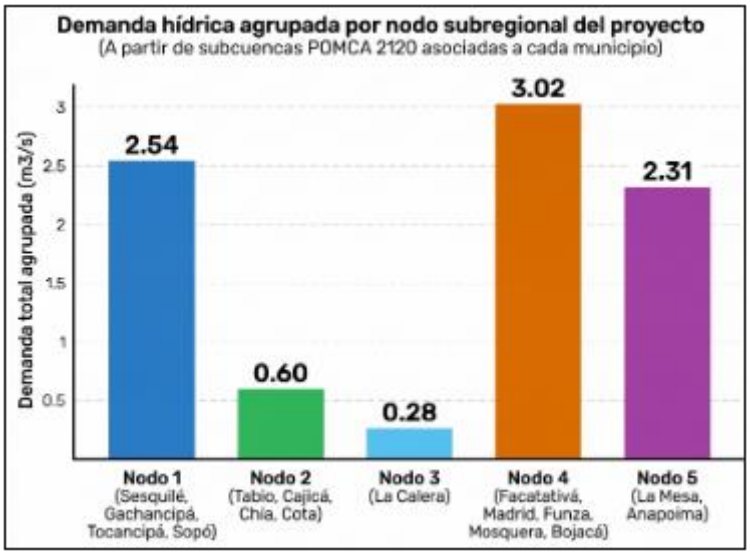
Tabla 64. Demanda hídrica total por subcuenca y asociación con los nodos subregionales del proyecto (POMCA Río Bogotá 2120

Subcuenca	Demanda Total (m³/s)	IUA	Rango IUA	Nodo / Municipios del proyecto
Río Bogotá (Sector Tibitoc-Soacha)	9,054	0,373	Alto	Media-Baja (intensa presión doméstica/industrial)
Río Tunjuelo	2,919	0,407	Alto	Cuenca media (Bogotá D.C.)
Río Balsillas	3,018	0,533	Muy Alto	Nodo 4: Facatativá, Madrid, Funza, Mosquera, Bojacá
Río Apulo	1,968	0,371	Alto	Nodo 5: La Mesa, Anapoima
Río Neusa	1,084	0,425	Alto	Nodo 1: Sesquilé, Gachancipá, Tocancipá, Sopó
Río Medio Bogotá (Salto-Apulo)	0,900	0,227	Alto	Cuenca media-baja
Río Bajo Bogotá	1,556	0,210	Alto	Nodo 5 (colector sector bajo)
Río Alto Bogotá	0,722	0,302	Alto	Nodo 1 (cabecera)
Río Bogotá (Sisga-Tibitoc)	0,456	0,223	Alto	Nodo 1-2 (transición)
Río Frío	0,452	0,229	Alto	Nodo 2: Tabio, Cajicá, Chía, Cota
Embalse del Muña	0,464	0,350	Alto	Cuenca media
Río Bogotá (Soacha-Salto)	0,408	0,297	Alto	Cuenca media
Río Soacha	0,374	0,509	Muy Alto	Cuenca media (alta presión)
Río Teusacá	0,281	0,085	Bajo	Nodo 3: La Calera
Embalse Tominé	0,281	0,124	Medio	Nodo 1: Sesquilé, Gachancipá, Tocancipá, Sopó
Río Calandaima	0,337	0,118	Medio	Nodo 5: La Mesa, Anapoima
Río Negro	0,179	0,325	Alto	Cuenca alta
Río Chicú	0,146	0,114	Medio	Nodo 2: Tabio, Cajicá, Chía, Cota

Subcuenca	Demanda Total (m³/s)	IUA	Rango IUA	Nodo / Municipios del proyecto
Embalse del Sisga	0,081	0,046	Bajo	Nodo 1 (regulación cabecera)
TOTAL	24,7	—	—	Doméstica 13,14 Agrícola 9,65 Pecuaria 0,6 Industrial 1,217 Otros 0,1

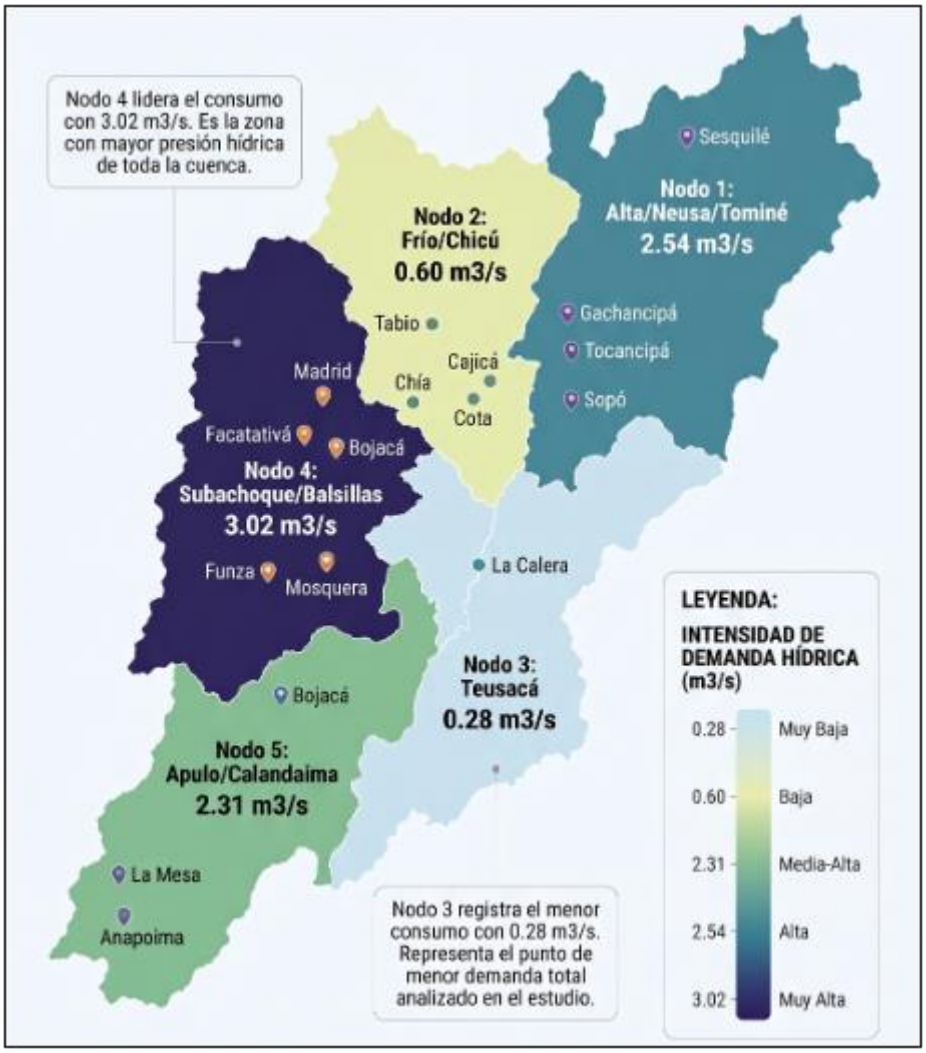
Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá (2120), Resumen Ejecutivo, Tabla 4-8 (Consorcio HUITACA, 2019). Demanda expresada en m³/s.

Figura 29. Demanda hídrica agrupada por nodo subregional del proyecto



Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá (2120), Resumen Ejecutivo, Tabla 4-8 (Consorcio HUITACA, 2019). Demanda expresada en m³/s.

Figura 30. Distribución espacial de la demanda hídrica de cada subcuenca de interés y la ubicación de los diferentes municipios.



Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá (2120), Resumen Ejecutivo, Tabla 4-8 (Consorcio HUITACA, 2019). Demanda expresada en m³/s.

5.1.2 CARACTERIZACIÓN DETALLADA DE LA DEMANDA HÍDRICA POR USOS

En esta sección se realiza la descripción cualitativa sector por sector. Para cada uso se describe la dinámica regional, los municipios con mayor presión de este uso y la tendencia proyectada a mediano/largo plazo, con base en la metodología de módulos de consumo del POMCA Río Bogotá (2120) y en la vocación productiva identificada en los POT/PDM de los municipios.

5.1.2.1 USO DOMÉSTICO (CONSUMO HUMANO Y SERVICIOS BÁSICOS)

El uso doméstico es el de mayor ponderación en la cuenca del río Bogotá, representando 13,14 m³/s de los 24,7 m³/s totales (aprox. 53 % de la demanda regional). El POMCA

identifica que las mayores demandas domésticas se concentran en la subcuenca del río Bogotá sector Tibitoc-Soacha (9,054 m³/s) y en el río Tunjuelo (2,919 m³/s), asociadas a la alta densidad poblacional del área metropolitana. En el área de influencia del proyecto, la presión doméstica es particularmente marcada en el nodo 2 (Chía, Cajicá, Cota y Tabio), donde el crecimiento urbano y la expansión inmobiliaria de la Sabana Norte generan una demanda sostenida de consumo humano y servicios básicos. La Calera (nodo 3) presenta dinámicas similares de expansión perímetral. La tendencia proyectada es creciente, impulsada por la concentración demográfica y la migración hacia la periferia de Bogotá D.C.

Se recomienda analizar, para la fase de factibilidad, las dotaciones netas según la Resolución 0330 de 2017 y las proyecciones demográficas municipales, contrastándolas con la capacidad de soporte de las subcuencas aportantes (especialmente Frío, Chicú y Teusacá).

5.1.2.2 Uso Agrícola (Riego de Cultivos)

El uso agrícola es el segundo de mayor magnitud (9,65 m³/s, approx. 39 % de la demanda total). El POMCA determina que las mayores demandas agrícolas se localizan en las subcuencas de los ríos Balsillas (3,018 m³/s), Apulo (1,968 m³/s) y Bajo Bogotá (1,556 m³/s). En el ámbito del proyecto, el nodo 4 (Facatativá, Madrid, Funza, Mosquera y Bojacá) concentra la mayor exigencia agropecuaria de la Sabana, destacándose los cultivos de flores bajo riego tecnificado y los distritos de riego del occidente (subcuenca Balsillas). En el nodo 1 (Tocancipá, Sopó, Gachancipá, Sesquilé) también se presenta agricultura de clima frío con riego complementario. La vocación agrícola de Tabio y Sopó (nodos 2 y 1) refuerza esta presión en la cuenca alta. La tendencia es de mantenimiento o leve incremento, condicionada a la disponibilidad hídrica en temporadas secas (Fenómeno del Niño).

5.1.2.3 Uso Pecuario (Abrevaderos y Procesos Productivos Animales)

La demanda pecuaria es comparativamente menor (0,6 m³/s, approx. 2,4 % del total), pero se distribuye en todas las subcuencas. El POMCA señala que el sector bovino es responsable de más del 66 % del consumo pecuario total, seguido por los sectores avícola y porcino. En el área del proyecto, la lechería especializada del norte de la Sabana (Sopó y Sesquilé, nodo 1) y la ganadería extensiva/porcina en zonas de ladera de los municipios de los nodos 2 y 4 ejercen una presión localizada sobre las fuentes de agua superficial y subterránea. La tendencia es estable, con potencial de incremento en sistemas intensivos de producción animal.

5.1.2.4 Uso Industrial (Procesos de Manufactura y Transformación)

La demanda industrial alcanza 1,217 m³/s (approx. 5 % del total) y se presenta predominantemente en la subcuenca del río Bogotá sector Tibitoc-Soacha, seguida de las subcuencas del río Neusa y del río Bogotá sector Sisga-Tibitoc. En el proyecto, los corredores industriales consolidados se localizan en Tocancipá, Gachancipá, Funza, Mosquera y Cota (nodos 1 y 4), con actividades de alimentos, bebidas, manufactura y logística cuya dependencia del recurso hídrico superficial y subterráneo es significativa. La tendencia es creciente, alineada con la expansión de la plataforma logística y productiva de la Sabana.

5.1.2.5 USO AMBIENTAL (CAUDALES ECOLÓGICOS Y PROTECCIÓN DE ECOSISTEMAS)

El uso ambiental garantiza el mantenimiento de caudales ecológicos para la preservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de las subcuencas aportantes. En el área del proyecto destacan las áreas de especial interés ambiental asociadas a los páramos de Guerrero y Chingaza (relacionados con las subcuencas de cabecera de los nodos 1 y 3), los humedales de la Sabana y las rondas hidráulicas del río Bogotá y sus afluentes (ríos Frío, Chicú, Teusacá, Subachoque, Balsillas). La protección de estas áreas es prioritaria, dado que el POMCA reporta que 14 de las 19 subcuencas presentan Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH) entre alto y muy alto, lo que subraya la necesidad de reservar caudal para soporte ecosistémico antes de asignaciones de consumo.

5.1.3 ANÁLISIS DE CONFLICTOS DE USO Y PRESIONES SOBRE EL RECURSO

Se identifican tensiones relevantes entre el crecimiento urbano e industrial de la Sabana y las actividades agropecuarias tradicionales. El nodo 2 (Chía, Cajicá, Cota, Tabio) y la periferia de La Calera (nodo 3) concentran la presión doméstica sobre subcuencas de caudal limitado (Frío, Chicú, Teusacá), mientras que el nodo 4 (Facatativá, Madrid, Funza, Mosquera, Bojacá) superpone la demanda agroindustrial (Balsillas, IUA Muy Alto) con la de los distritos de riego y la industria de flores. Esta superposición genera escenarios de competencia por el recurso, especialmente en épocas de estiaje.

Fenómenos como El Niño (sequías) incrementan la demanda de riego en los nodos 1 y 4 y elevan el riesgo de desabastecimiento doméstico en los nodos 2 y 5 (La Mesa, Anapoima), donde el POMCA señala marcada vulnerabilidad en temporadas secas. Por el contrario, La Niña puede agravar problemas de calidad por vertimientos y ocupación de rondas. La alta vulnerabilidad hídrica estructural de la cuenca (14 de 19 subcuencas con IVH alto/muy alto) refuerza la conveniencia de un esquema regional articulado que reconozca la capacidad de soporte de cada microcuenca.

5.1.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LA DEMANDA

La caracterización cualitativa permite concluir que la demanda hídrica regional está dominada por el uso doméstico (53 %) y agrícola (39 %), concentrándose las mayores presiones en la cuenca media-baja (Tibitoc-Soacha, Tunjuelo, Balsillas) y presentando vulnerabilidad elevada en buena parte de las subcuencas aportantes de los 16 municipios. Los nodos con mayores retos de demanda son el nodo 4 (alta exigencia agroindustrial, Balsillas IUA Muy Alto) y el nodo 2 (presión doméstica sobre cauces de baja regulación). El nodo 5 (La Mesa, Anapoima) presenta la mayor vulnerabilidad al desabastecimiento estacional.

Para el desarrollo de este análisis, se tomaron como base técnica los datos del POMCA del Río Bogotá, al consolidarse como la fuente de información más completa, robusta y detallada disponible para la caracterización de estas subcuencas.

Como líneas de acción para la fase de factibilidad se recomienda: (i) calcular caudales específicos y proyecciones demográficas cuantitativas por subcuenca; (ii) determinar dotaciones netas conforme a la Resolución 0330 de 2017; (iii) evaluar esquemas de trasvase y regulación desde las subcuencas de cabecera (nodos 1 y 3) hacia las de mayor demanda; y (iv) priorizar la protección de las microcuencas con IVH alto/muy alto para garantizar la sostenibilidad del Acueducto Regional de la Sabana.

6 ANEXOS

- Anexo 00 Series
- Anexo 01 Consistencia Precipitación
- Anexo 02 Consistencia otras variables
- Anexo 03 Completado de datos
- Anexo 04 ETP

7 BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (2003). *El estudio del desarrollo sostenible del agua subterránea en la Sabana de Bogotá en la República de Colombia: Informe final, informe principal*. JICA; Yachiyo Engineering Co., Ltd.; Asia Air Survey Co., Ltd.

Ahrens, C. D. (2012). Meteorology Today: An Introduction to Weather, *Climate, and the Environment* (10th ed.). Brooks/Cole.

Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661-675.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998)**.** *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO.

Aparicio Mijares, J., Lafragua Contreras, J., Gutiérrez López, A., Mejía Zermeño, R., & Aguilar Garduño, E. (2006). *Evaluación de los recursos hídricos: elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*. Documentos Técnicos del PHI-LAC, No. 4. UNESCO.

Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2003). *Atmosphere, Weather and Climate* (8th ed.). London: Routledge.

Bastidas, B. D., Ossa, J., Martínez, C., Vela, M. A., Betancur, T., & Osorio, A. (2022). Region-scale estimation of potential groundwater recharge in soft and hard rock formations through a distributed water balance in the area of influence of the tropical dry forest in the Cauca River canyon, Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico, 49*(1), 77-101. https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.1.2022.625

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*, 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324.

Campos-Aranda, D. F. (2010). Verificación de la homogeneidad regional mediante tres pruebas estadísticas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 157-165.

Consorcio Redes. (2016). *Caracterización climatológica e identificación del potencial hídrico superficial disponible en el área del proyecto: Informe Producto 3*. Contrato No. 252 de 2015, “Consultoría para estructurar técnica, jurídica y financieramente los procesos de

planificación, viabilización, contratación, construcción y operación del Acueducto Regional de la Sabana". Gobernación de Cundinamarca; Empresas Públicas de Cundinamarca.

FAO56 package (versión 1.0). A package for computing the crop evapotranspiration and evapotranspiration rate from the reference surface by *FAO Penman-Monteith equation. R Project.*

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data, 2*, 150066. doi:10.1038/sdata.2015.66.

Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology, 228*(1-2), 113-129. doi:10.1016/S0022-1694(00)00144-X.

Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G. & Barbosa-Moreno, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 157-177.

Guijarro, J. A. (2026). *The climatol R package* (Versión 4.5-0) [Software]. CRAN. https://www.climatol.eu

Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., & Rossiter, D. G. (2007). About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences, 33*(10), 1301-1315. doi:10.1016/j.cageo.2007.05.001.

Hengl, T., Nussbaum, M., Wright, M. N., Heuvelink, G. B. M., & Gräler, B. (2018). Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ, 6*, e5518. doi:10.7717/peerj.5518.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. doi:10.1002/qj.3803.

Hirsch, R. M., Slack, J. R. & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1), 107-121.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM. (2023). Estudio Nacional del Agua 2022. Bogotá D.C.: *IDEAM*.

Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. En I. Olkin et al. (Eds.), *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling* (pp. 278-292). Stanford University Press.

Ljung, G. M. & Box, G. E. P. (1978). On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, 65(2), 297-303.

Mann, H. B. & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50-60.

Marulanda López, J. E. (2019). *Consistencia, homogeneidad y validez de información hidrometeorológica en la cuenca alta del río Chicamocha (1987-2016)* (Trabajo de grado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.

Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology, 58*(8), 1246-1266. doi:10.2113/gsecongeo.58.8.1246.

Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review, 80*(8), 129–133. doi:10.1175/1520-0493(1952)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2.

Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Computers & Geosciences, 30*(7), 683–691. doi:10.1016/j.cageo.2004.03.012.

Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.

Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92.

Sattari, M.-T., Rezazadeh-Joudi, A., & Kusiak, A. (2017). Assessment of different methods for estimation of missing data in precipitation studies. *Hydrology Research, 48*(4), 1032–1044. doi:10.2166/nh.2016.364.

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.

SIAM S.A. & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2006). *Inclusión del balance hídrico, implementación del modelo hidrogeológico y capacitación en MODFLOW*. CAR.

Stekhoven, D. J., & Bühlmann, P. (2012). MissForest—non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics, 28*(1), 112–118. doi:10.1093/bioinformatics/btr597.

Wald, A. & Wolfowitz, J. (1940). On a test whether two samples are from the same population. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(2), 147-162.

Whiteman, C. D. (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. New York: Oxford University Press.

Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3rd ed.). Academic Press.

WMO (World Meteorological Organization). (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. WMO-No. 1203. Geneva.

Wood, S. N. (2006). *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.

Wright, M. N., & Ziegler, A. (2017). ranger: A fast implementation of Random Forests for high-dimensional data in C++ and R. *Journal of Statistical Software, 77*(1), 1–17. doi:10.18637/jss.v077.i01.

Yevjevich, V. (1972). *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications.