g) Caudal

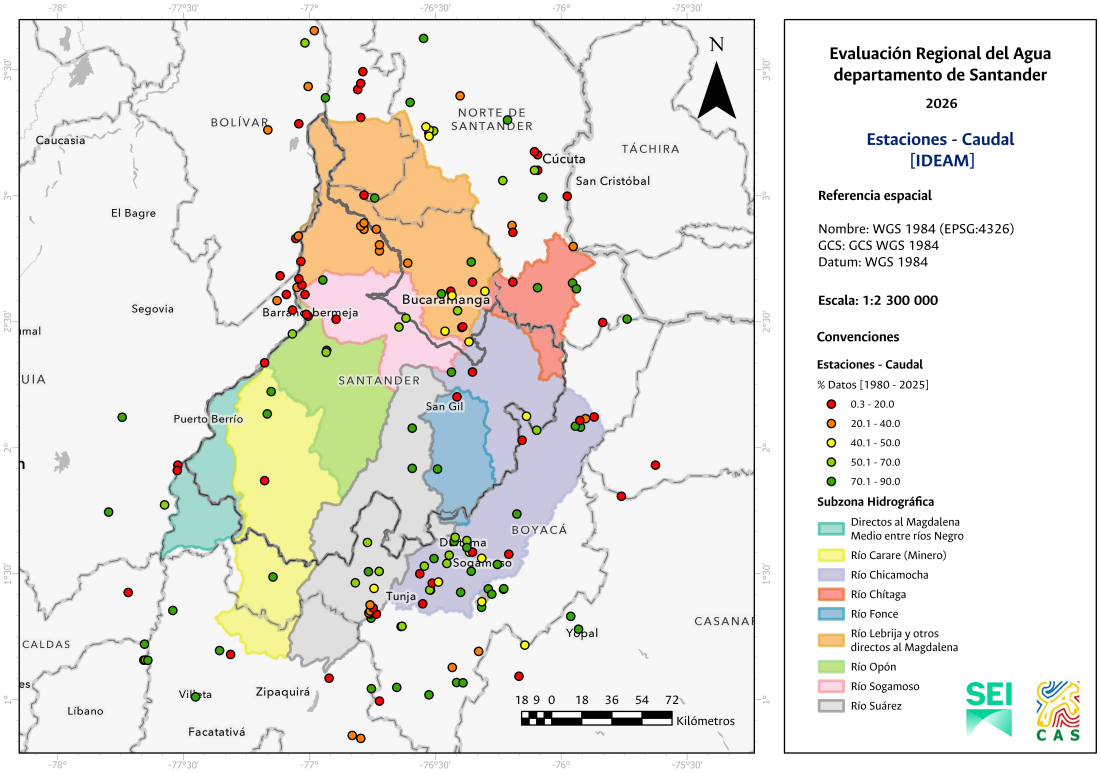


Figura 8 Distribución espacial de la red de estaciones hidroclimáticas recopiladas para las variables: a) Precipitación, b) Humedad Relativa, c) Temperatura, d) Velocidad del viento, e) Brillo solar, f) Evapotranspiración y g) Caudal superficial en el departamento de Santander y zonas circundantes.
Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM.

En general, la precipitación y el caudal superficial presentan la mayor densidad de estaciones y la mejor cobertura espacial dentro de la jurisdicción de la CAS y en las áreas circundantes. La red de precipitación es particularmente amplia y presenta estaciones distribuidas en las diferentes subzonas hidrográficas, mientras que la información de caudal se concentra principalmente sobre los principales cauces y sistemas de drenaje. Esta disponibilidad constituye una condición favorable para la caracterización de la variabilidad espacial de la precipitación y para los posteriores procesos de calibración y validación del modelo hidrológico.

Las variables de temperatura y humedad relativa presentan una disponibilidad menor que la precipitación, aunque cuentan con estaciones distribuidas tanto dentro de la jurisdicción como en sectores circundantes de Boyacá, Norte de Santander y otras áreas vecinas. La incorporación de estas estaciones externas resulta especialmente importante para mejorar la representación espacial de las variables climáticas en sectores próximos a los límites de la jurisdicción y reducir los efectos asociados con una menor densidad de observaciones en determinadas unidades hidrográficas.

Por el contrario, la disponibilidad de información de evaporación, brillo solar y velocidad del viento es considerablemente más limitada, siendo esta última la variable con menor número de estaciones y la distribución espacial más discontinua. Esta condición deberá ser considerada al momento de definir su utilización en la modelación y en los procedimientos de regionalización, debido a que una menor densidad de estaciones incrementa la incertidumbre en la representación espacial de estas variables.

Adicionalmente, los registros presentan diferencias importantes en su disponibilidad temporal durante el periodo 1980–2025. Aunque una proporción importante de las estaciones presenta porcentajes elevados de información disponible, también se identifican estaciones con registros parciales o discontinuos. Por esta razón, la totalidad de las estaciones recopiladas no necesariamente será utilizada en la modelación, sino que deberá realizarse una selección posterior considerando criterios de calidad, continuidad temporal y representatividad espacial.

La información climática recopilada de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, brillo solar y evaporación constituye la base para la caracterización climática y la construcción de las series requeridas como forzantes del modelo hidrológico. En particular, la información de precipitación, temperatura y humedad relativa será utilizada en los procesos de regionalización espacial desarrollados para representar la variabilidad climática de la jurisdicción. Por su parte, los registros de caudal superficial serán utilizados como información observada de referencia para la evaluación, calibración y validación de los caudales simulados mediante el modelo WEAP.

3.1. Caracterización Climática Histórica

Para la caracterización del clima histórico en la jurisdicción de la CAS se consideró el período 1980–2025, con base en las estaciones hidroclimáticas del IDEAM. Un adecuado desarrollo de la ERA requiere contar con series climáticas continuas y espacialmente distribuidas, que permitan representar la variabilidad climática del territorio y asignar condiciones representativas a cada unidad de respuesta hidrológica dentro del modelo hidrológico.

Por esta razón, se realizó la regionalización de las principales variables climáticas requeridas para la modelación: precipitación, temperatura, humedad relativa, fracción nubosa y velocidad del viento. Este proceso permitió transformar la información puntual de estaciones y fuentes complementarias en productos grillados continuos para el período de análisis. Los resultados fueron almacenados en formato NetCDF, con estructura espaciotemporal en tres dimensiones: latitud, longitud y tiempo (Figura 9).

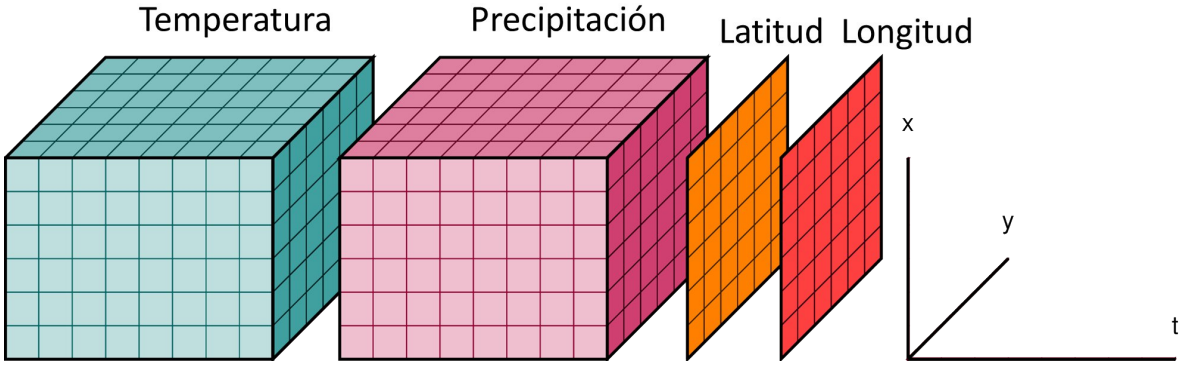


Figura 9. Esquema del formato netcdf.

Fuente: Modificado de https://www.guillaumedueymes.com/courses/tutorial_python_netcdf/1-netcdf_tutorial/.

La regionalización se desarrolló mediante metodologías diferenciadas, definidas según la disponibilidad, calidad y representatividad de la información para cada variable, como se detalla en las siguientes secciones. En síntesis, la precipitación, la temperatura y la humedad relativa se generaron principalmente a partir de estaciones IDEAM; la fracción nubosa se estimó con base en la información de brillo solar; y la velocidad del viento se incorporó a partir de la selección del producto

grillado global con mejor representatividad para el área de estudio. La Tabla 2 resume las variables procesadas, su resolución espacial, temporalidad y estrategia metodológica.

Tabla 2 Variables climáticas regionalizadas para el período 1980 – 2025.

Variable	Resolución espacial	Temporalidad	Estrategia de regionalización
Precipitación	1 km	Diaria	IDW
Temperatura	1 km	Diaria	Relación lineal temperatura - elevación por área hidrográfica
Humedad Relativa	1 km	Diaria	IDW por bandas de elevación
Fracción Nubosa	1 km	Promedio diario	Relación con elevación por área hidrográfica.
Velocidad del viento	4 km	Promedio diario	Selección de producto grillado global con mejor representatividad.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Depuración y Relleno de Series Climáticas

Previo a la regionalización de las variables climáticas, las series de precipitación, temperatura y humedad relativa fueron revisadas con el propósito de identificar y remover valores atípicos. Una vez depuradas las series, se evaluó la disponibilidad de información para el período 1980-2025 y se seleccionaron las estaciones con más del 50 % de datos disponibles. Como resultado de este proceso, se descartaron 130 estaciones de precipitación, 78 de temperatura y 43 de humedad relativa. En consecuencia, las estaciones seleccionadas para el proceso de regionalización fueron

- Precipitación (335 estaciones)
- Temperatura (57 estaciones)
- Humedad relativa (53 estaciones)

Para brillo solar y velocidad del viento, la disponibilidad temporal y espacial de información fue más limitada, por lo que estas variables requirieron un tratamiento diferenciado.

Dado que ninguna de las estaciones seleccionadas presentó series completamente continuas para el período 1980-2025, fue necesario implementar un proceso de relleno de datos faltantes. Este procedimiento permitió mejorar la continuidad temporal de las series antes de su uso en los procesos de regionalización y análisis climático de las variables

Antes de realizar el relleno de datos faltantes, se analizó la relación de las variables climáticas con factores geográficos como latitud, longitud y elevación del terreno. También se revisaron las correlaciones entre estaciones y entre variables. En general, las correlaciones identificadas no fueron suficientemente robustas para justificar un relleno cruzado entre estaciones o variables. No obstante, se evidenciaron relaciones relevantes entre la elevación y las variables de temperatura y humedad relativa, las cuales fueron consideradas posteriormente en sus respectivos procesos de regionalización.

Con base en estos resultados, el relleno de datos faltantes se aplicó a las series de precipitación, temperatura y humedad relativa mediante el método k-NN, o k vecinos más cercanos. En este caso, el método se utilizó para completar los valores faltantes a partir de patrones previamente observados en las series climáticas. El procedimiento general consistió en:

1. Para el período o día con datos faltantes, comparar la información existente en el período anterior con todos los días de la base de datos.
2. Seleccionar un set de períodos con la menor diferencia con la información comparada en el paso anterior.
3. Seleccionar aleatoriamente uno de los períodos seleccionados en el paso anterior (los períodos con menor diferencia se les asigna mayor probabilidad).
4. Rellenar los datos faltantes con la información del período posterior al período seleccionado en el paso anterior.

Es importante notar que una de las restricciones del procedimiento es que debe existir información para las estaciones faltantes en período posterior al escogido en el paso 3. Caso contrario, se volverá a tener estaciones sin datos y no se lograría el objetivo del relleno.

El proceso de relleno se realizó de forma conjunta para todas las estaciones, pero independiente para cada variable. De esta forma, se obtuvieron series completas cuya correlación espacial, autocorrelación y variación estacional es consistente con las de las series originales. Las series resultantes a escala diaria y anual para las tres variables se presentan en la Figura 10 a Figura 15. Las series rellenadas no presentan saltos abruptos y logran consistencia en los patrones de las series originales. Adicionalmente, en los períodos largos sin información se observan valores rellenados consistentes con los períodos previos y posteriores tanto en las tres variables (temperatura, precipitación y humedad relativa).

En términos de la variación estacional, la Figura 16 muestra cambios que no modifican los órdenes de magnitud tanto de los promedios diarios como mensuales. En el caso de la desviación estándar, se observa un aumento en la variabilidad en la precipitación de los días secos, sin embargo, a escala mensual esta influencia no es notoria. Esto está asociado al relleno de días que tienen varios vacíos en las series originales; sin embargo, a escala mensual los volúmenes totales mantienen su variabilidad, lo que es satisfactorio, considerando los alcances y las características de los datos.

En cuanto a correlaciones entre variables, la Figura 17 muestra la matriz de correlaciones antes y después del relleno de las estaciones. Las correlaciones presentan cambios en magnitud, sin embargo, mantienen el patrón general que inicialmente tenían las observaciones.

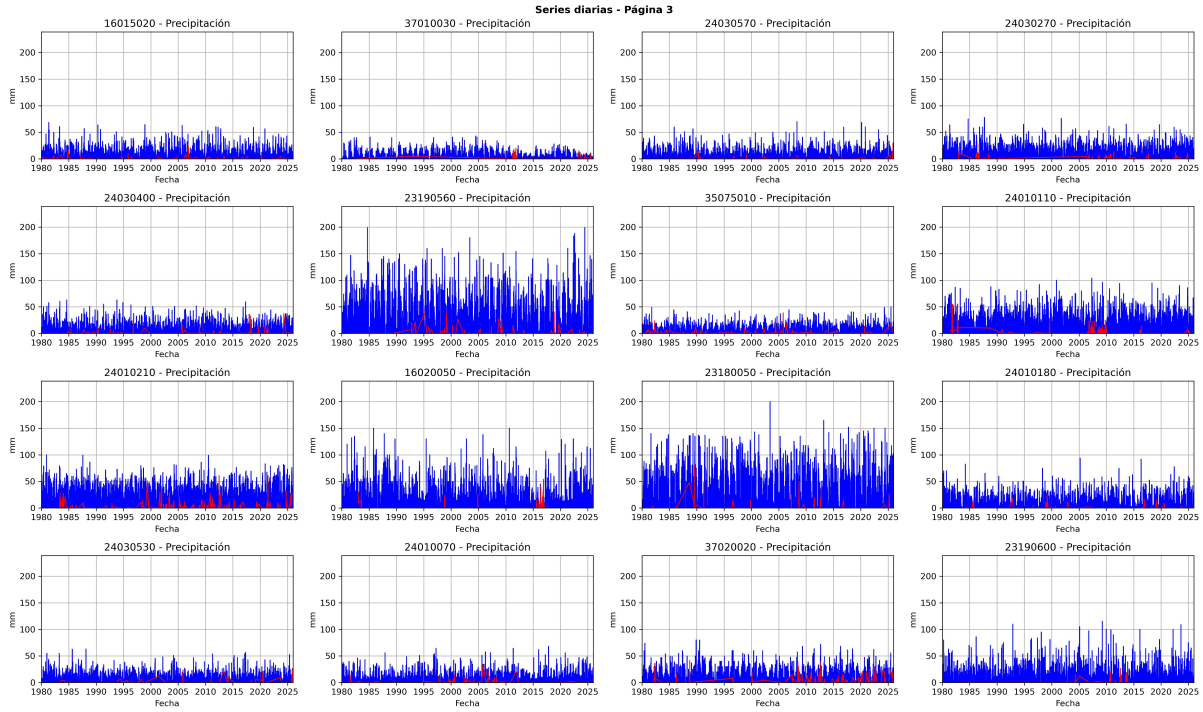


Figura 10. Comparación de series de precipitación originales y rellenadas a escala diaria.
Nota: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.
Fuente: Elaboración propia.

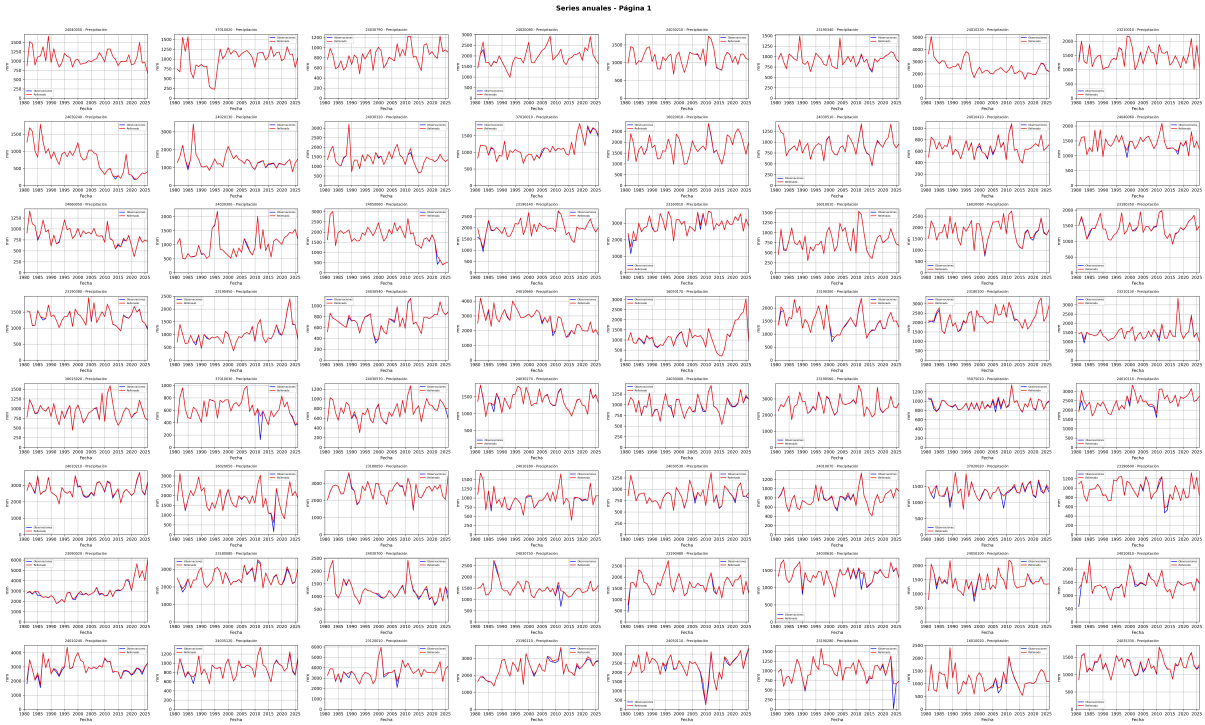


Figura 11. Comparación de series de precipitación originales y rellenadas a escala anual.
Nota 1: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.
Nota 2: Para las series originales (azul), los valores bajos para precipitación están asociados a pocos valores para la suma anual.

Fuente: Elaboración propia.

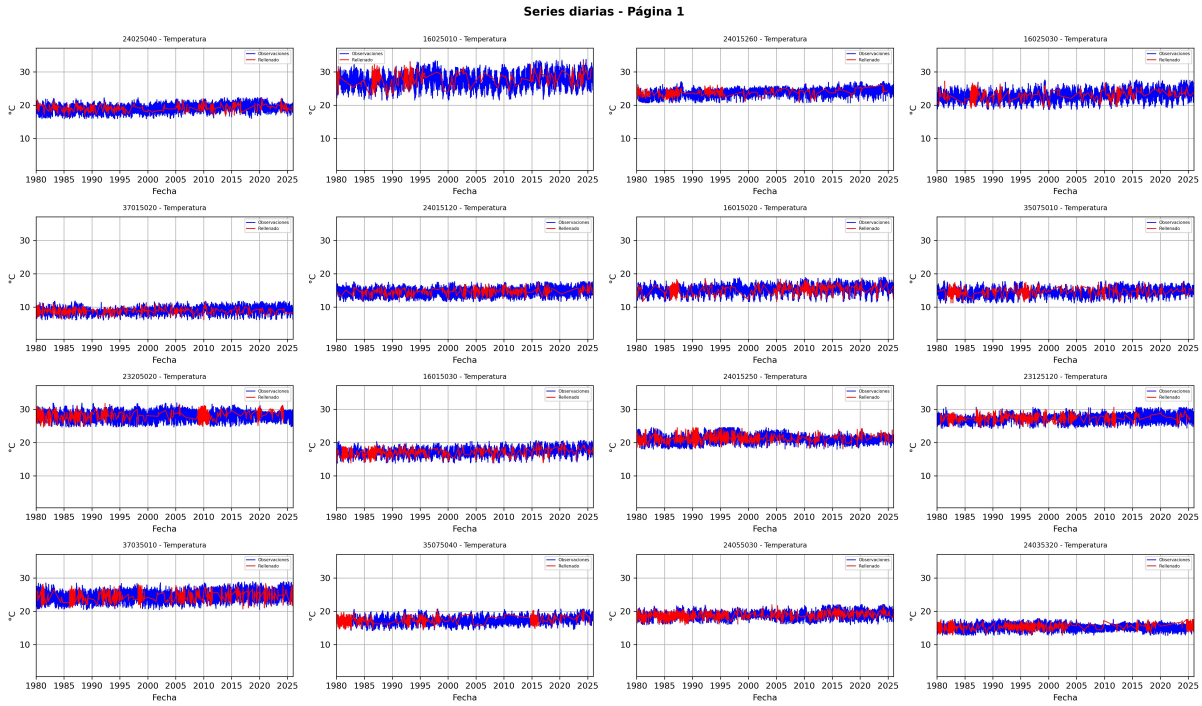


Figura 12. Comparación de series de temperatura originales y rellenadas a escala diaria.

Nota: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.

Fuente: Elaboración propia.

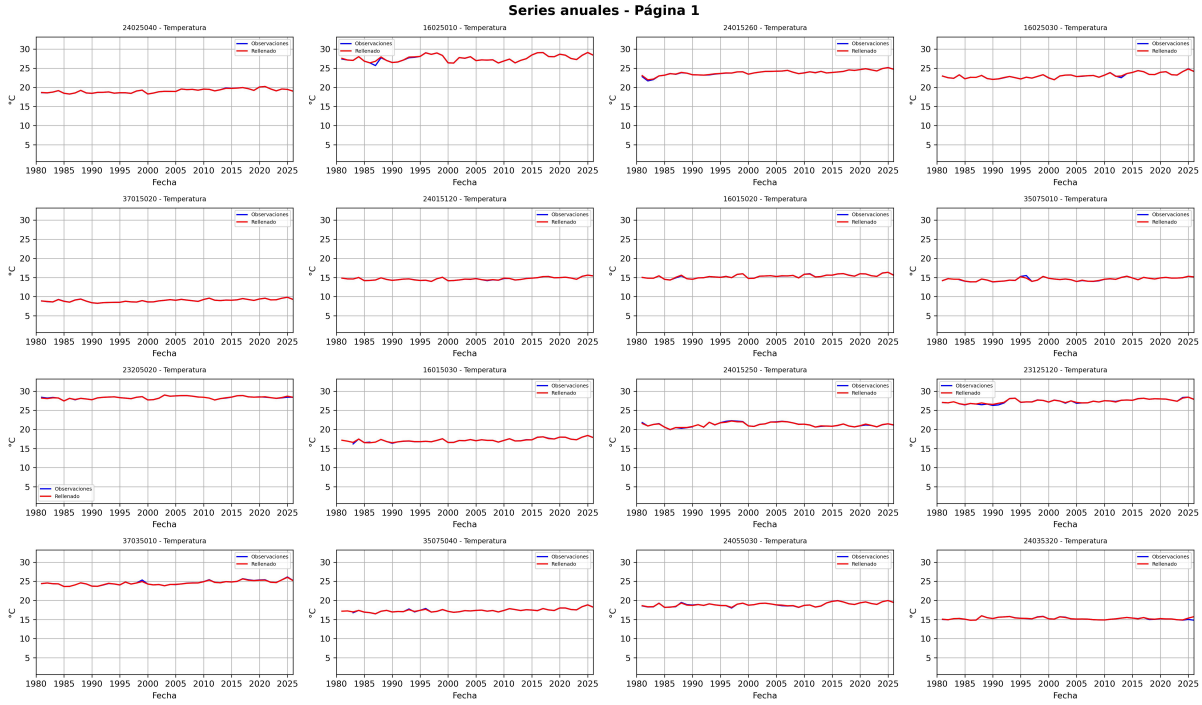


Figura 13. Comparación de series de temperatura originales y rellenadas a escala anual.

Nota: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.

Fuente: Elaboración propia.

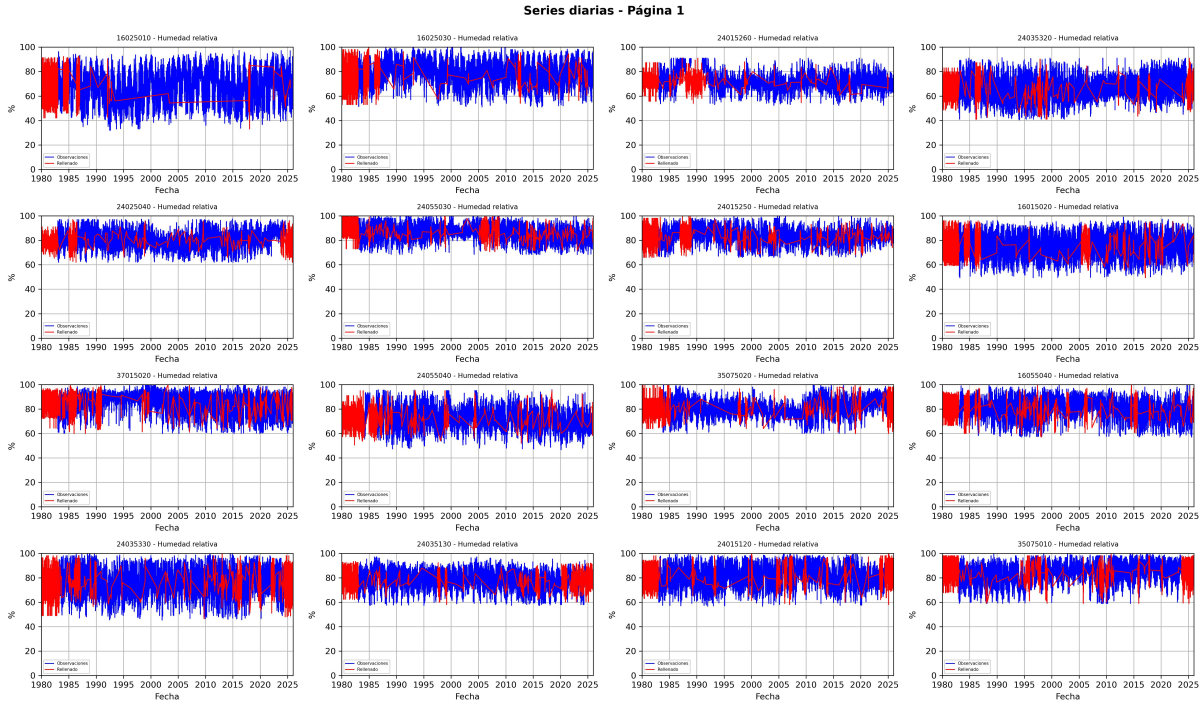


Figura 14. Comparación de series de humedad relativa originales y rellenadas a escala diaria.

Nota: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.

Fuente: Elaboración propia.

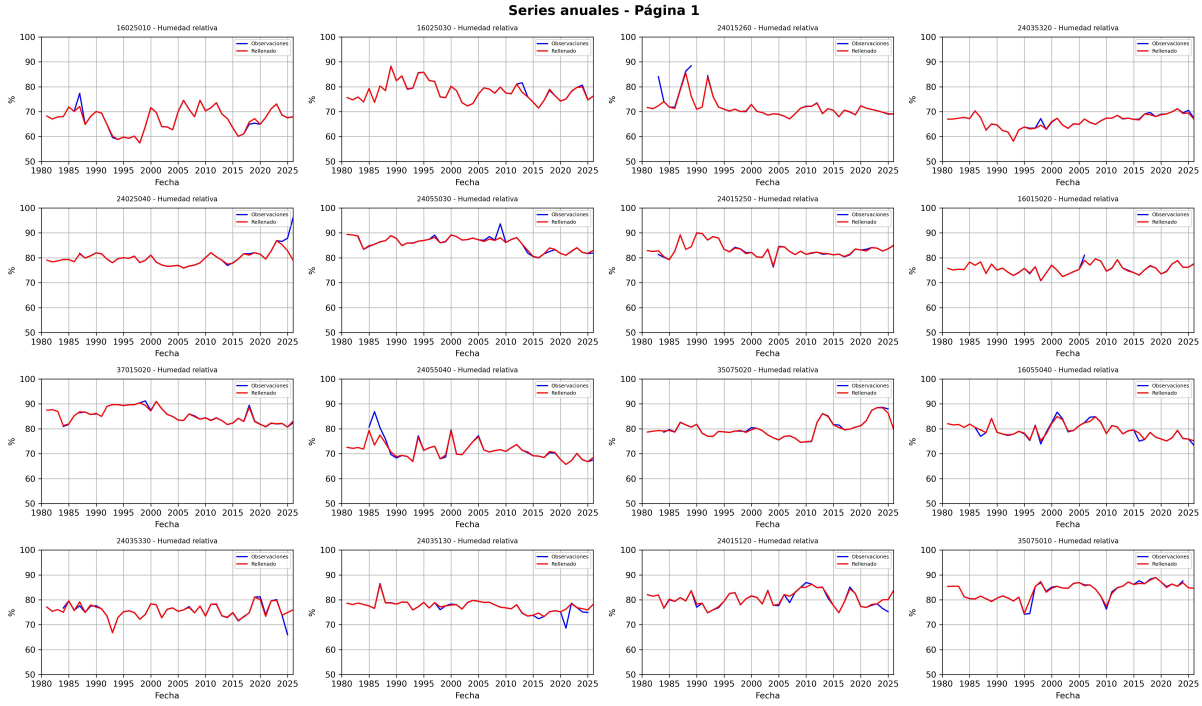


Figura 15. Comparación de series de humedad relativa originales y rellenadas a escala anual.

Nota: En azul se muestran los valores originales y en rojo los valores rellenados.

Fuente: Elaboración propia.

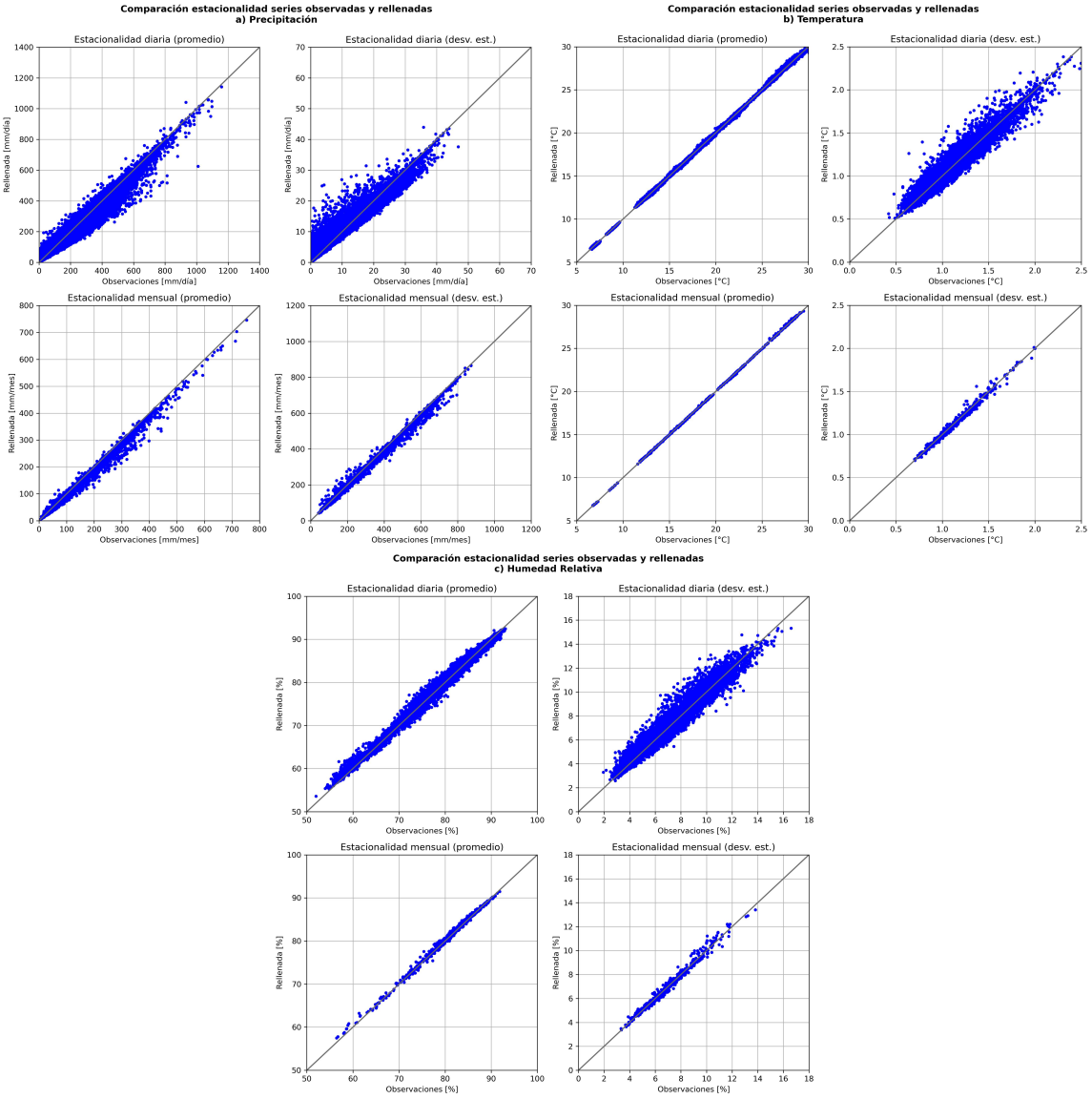


Figura 16. Comparación de la estacionalidad de las series originales y rellenadas. a) Precipitación, b) temperatura y c) humedad relativa.

Fuente: Elaboración propia.

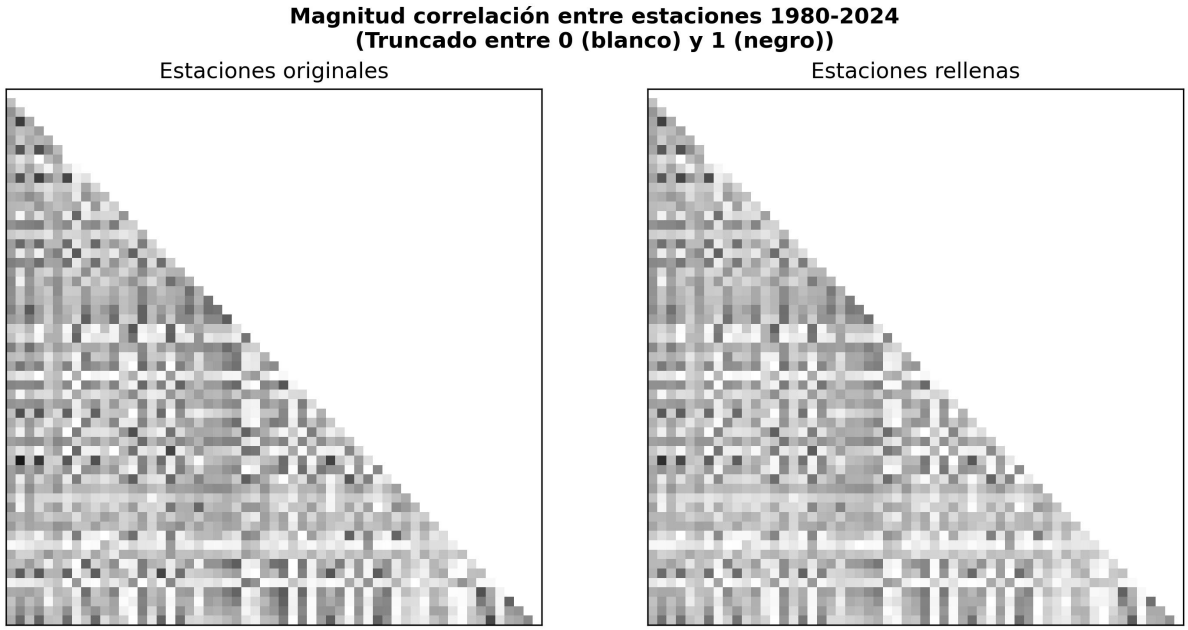


Figura 17. Comparación del patrón de la matriz de correlaciones antes y después del relleno de series.

Nota 1: En la matriz de correlaciones se omitieron los valores de la diagonal, correspondientes a correlación 1.
Nota 2: Color negro representa correlación de 1 y color blanco correlación menor a 0 (sin considerar la diagonal).
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Precipitación

La precipitación no presentó relaciones evidentes con la elevación, latitud o longitud, por lo que su regionalización se realizó mediante interpolación espacial. Para ello, se aplicó el método de ponderación por el inverso de la distancia al cuadrado (IDW por sus siglas en inglés, considerando un factor de orden 2), a una resolución espacial de 1 km y escala diaria. Este método busca interpolar y extrapolar la información climática, priorizando la información más cercana a cada punto. De esta forma, se generó una grilla uniforme y para cada celda de la grilla, la serie de tiempo de la variable a regionalizar se expresa como:

$$x_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^{n_e} w_{i,j} o_j(t)}{\sum_{j=1}^{n_e} w_{i,j}} \quad ; \quad w_{i,j} = \left(\frac{1}{d_{i,j}}\right)^2$$

donde $x_i(t)$ es el valor de la variable a regionalizar en la celda i de la grilla, para un instante de tiempo t; $o_j(t)$ es el valor de la variable a regionalizar en la estación j, para un instante de tiempo t; $d_{i,j}$ es la distancia entre el centroide de la celda i y la estación j; $w_{i,j}$ es el peso o factor ponderador asociado a la celda i y la estación j; y n_e es el número de estaciones disponibles para la variable a regionalizar. Para cada celda a interpolar se consideró un máximo de 10 estaciones.

La Figura 18 y Figura 19 muestra la distribución espacial de los promedios mensuales multianual y promedios anuales de precipitación para las subzonas hidrográficas dentro de la jurisdicción de CAS en Santander.

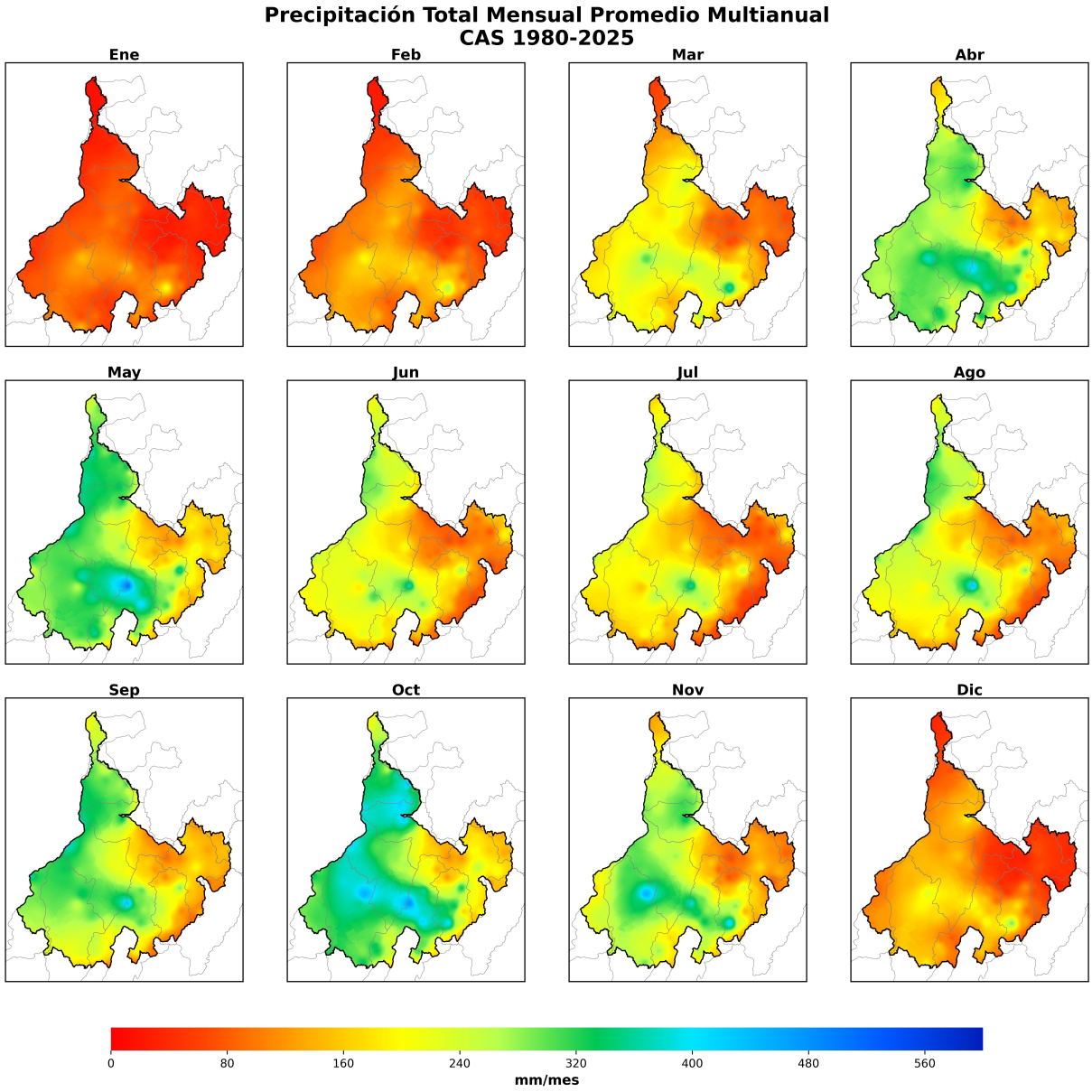


Figura 18. Precipitación total promedio mensual multianual en la jurisdicción de CAS, periodo 1980 – 2025.

Fuente: Elaboración propia.

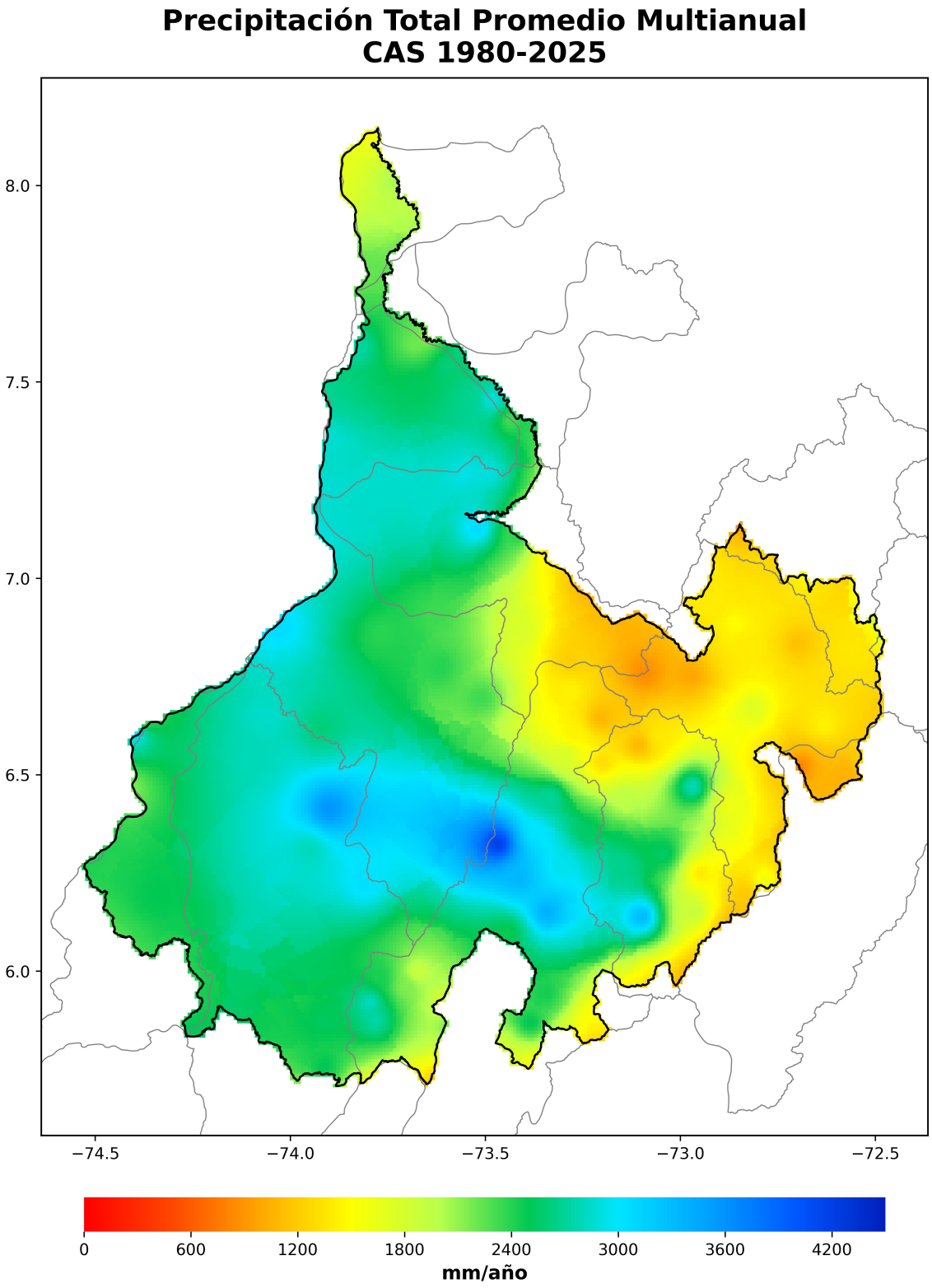


Figura 19. Precipitación total promedio anual en la jurisdicción de CAS, periodo 1980 – 2025.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Temperatura

La temperatura presentó una relación fuerte y consistente con la elevación. Por esta razón, su regionalización se realizó mediante relaciones lineales temperatura–elevación. El gradiente mensual de temperatura con la altura se estimó considerando los valores de la temperatura media diaria para las estaciones seleccionadas, y la espacialización se realizó a partir del modelo digital de elevación de de 12.5 m, agregado desde la resolución original de 12 m a la resolución de trabajo de 1 km.

Este enfoque permitió representar los gradientes térmicos asociados a la alta variabilidad altitudinal en el área de estudio. La Figura 20 y Figura 21 muestran la distribución espacial de los promedios mensuales multianual y promedios anuales de temperatura para las subzonas hidrográficas dentro de la jurisdicción de CAS en Santander.

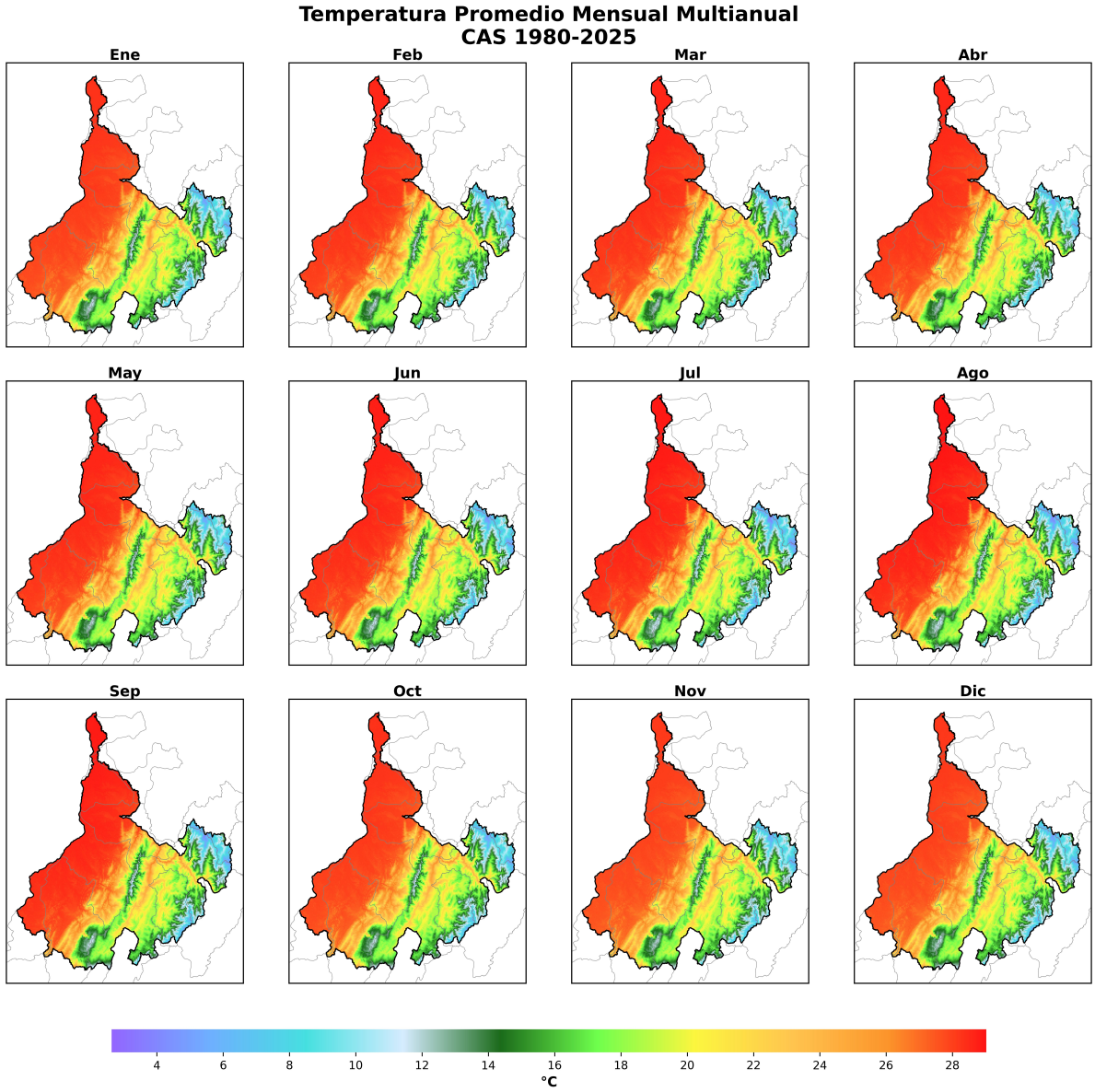


Figura 20. Temperatura media mensual en la jurisdicción de CAS, periodo 1980 – 2025.
Fuente: Elaboración propia.

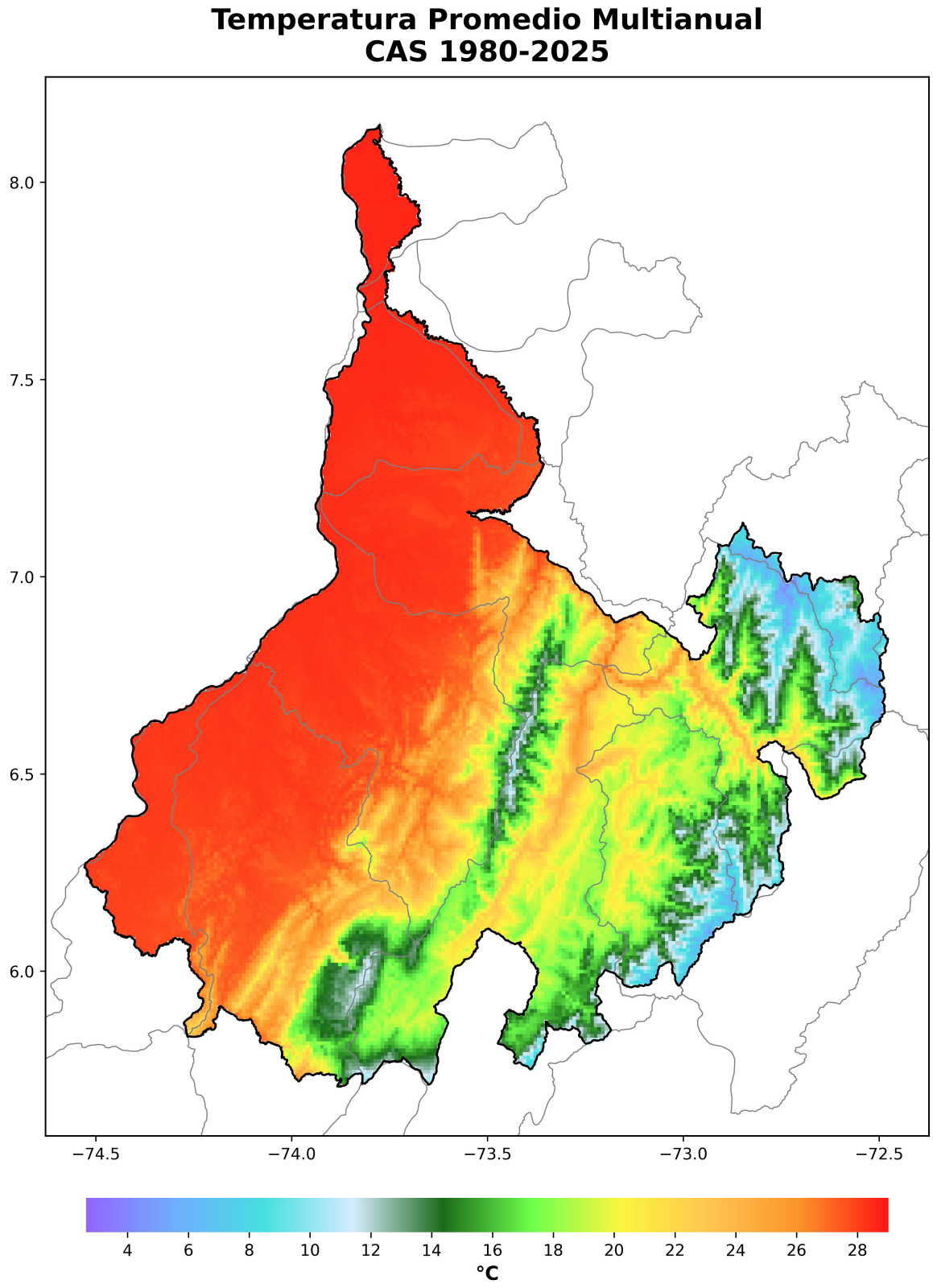


Figura 21. Temperatura media anual en la jurisdicción de CAS, periodo 1980 – 2025.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Humedad Relativa

La humedad relativa presentó una relación con la elevación, aunque menos directa que la observada para la temperatura. Por esta razón, se adoptó un enfoque combinado entre interpolación espacial y diferenciación altitudinal.

La regionalización se realizó mediante IDW de orden 2, considerando un máximo de 10 estaciones y restringiendo la selección de estaciones según bandas de elevación. Las bandas utilizadas fueron:

- Para celdas entre 0 y 1000 m s. n. m., se consideraron estaciones entre 0 y 1200 m s. n. m.
- Para celdas entre 1000 y 2000 m s. n. m., se consideraron estaciones entre 800 y 2200 m s. n. m.
- Para celdas entre 2000 y 3000 m s. n. m., se consideraron estaciones entre 1800 y 4000 m s. n. m.
- Para celdas por encima de 3000 m s. n. m., se consideraron estaciones ubicadas por encima de 2600 m s. n. m.

La Figura 22 y Figura 23 muestran la distribución espacial de los promedios mensuales multianual y promedios anuales de humedad relativa para la jurisdicción de CAS en Santander.

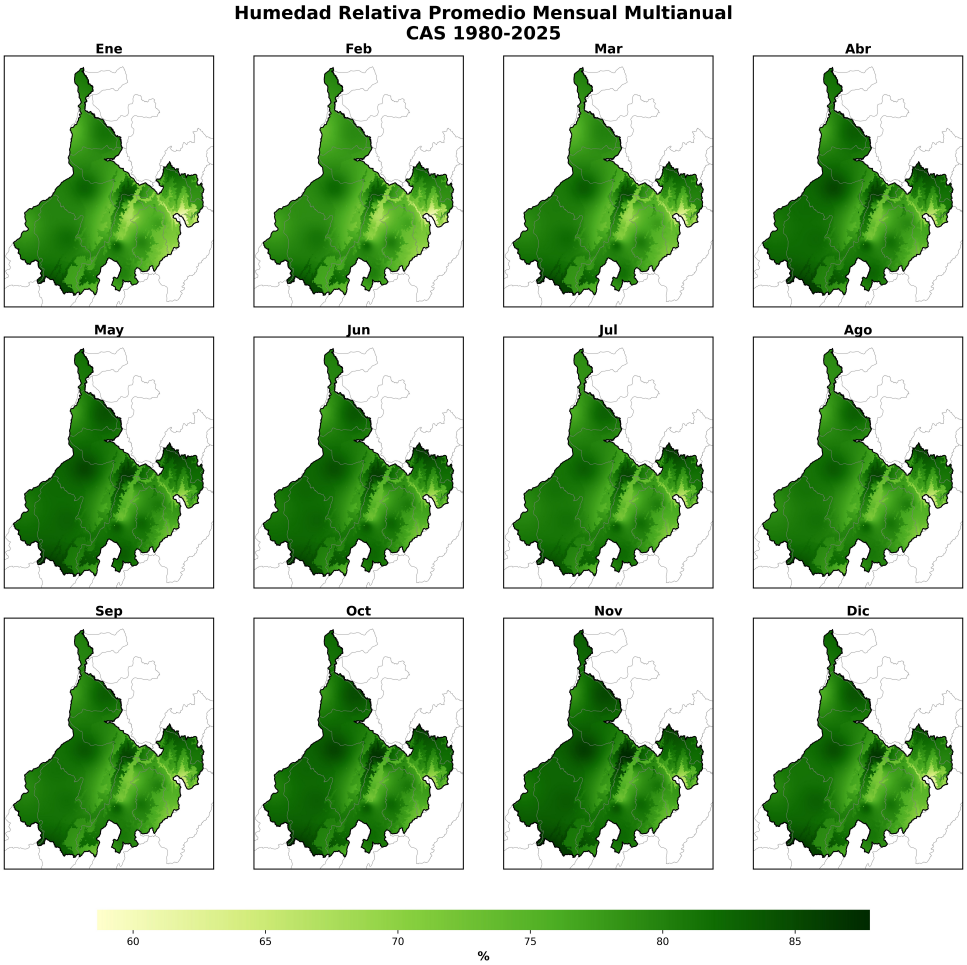


Figura 22. Humedad relativa media mensual en la jurisdicción de CAS, periodo 1980 – 2025.
Fuente: Elaboración propia.

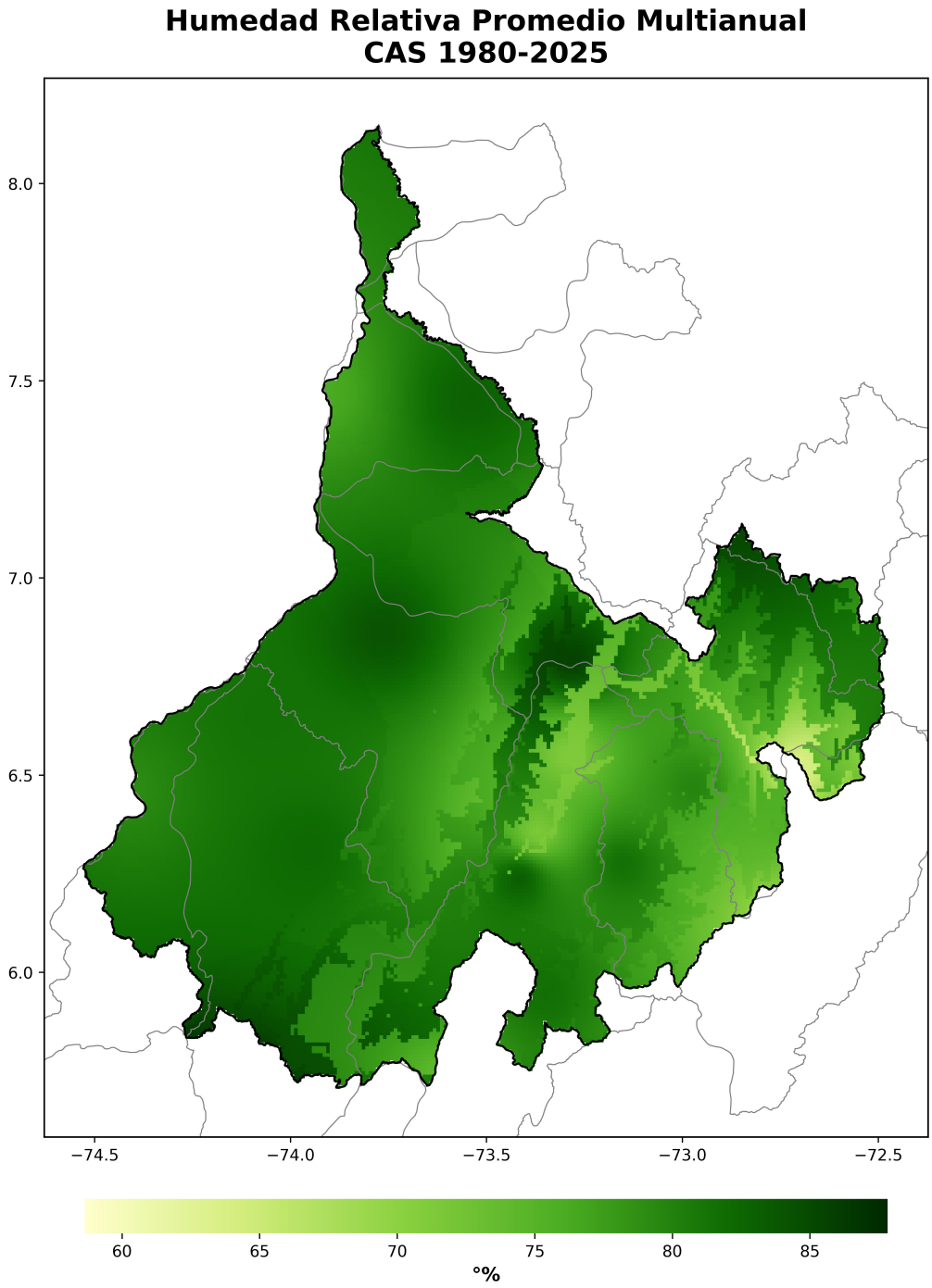


Figura 23. Humedad relativa media anual en la jurisdicción de CAS, periodo 1980 – 2025.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.5. Brillo Solar y Fracción Nubosa

Para la modelación hidrológica en WEAP se requiere información de fracción nubosa, por lo que la información de brillo solar disponible en estaciones IDEAM fue transformada a esta variable. La conversión se realizó a partir de la relación entre las horas de brillo solar observadas y la duración

máxima teórica de insolación diaria, siguiendo las formulaciones astronómicas de la FAO (Allen et al., 2006).

$$F = \frac{n}{N} \quad ; \quad N = \frac{24}{\pi}\omega \quad ; \quad \varphi = \frac{\pi}{180} lat$$

$$\omega = arcos\left[-\tan(\varphi)\tan(\delta)\right] \quad ; \quad \delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

donde F corresponde a la fracción nubosa, n corresponde a las horas de brillo solar, N corresponde a la duración máxima de insolación, φ representa la latitud de la estación en radianes, lat corresponde a la latitud de la estación en grados, J el número del día el año calendario considerando valores entre 1 y 365 entre el 1 de enero y 31 de diciembre. Valores de $F = 0$ indican nubosidad total y $F = 1$ indican nula presencia de nubes.

Aunque se identificaron 38 estaciones de brillo solar con más del 50 % de datos disponibles, estas no presentan una distribución espacial suficiente para una regionalización directa en todo el departamento. Por lo cual, se considera un promedio diario multianual para toda la serie de modelación.

3.1.6. Velocidad del Viento

La velocidad del viento disponible en estaciones IDEAM corresponde comúnmente a mediciones realizadas a 10 m sobre el nivel del terreno. Sin embargo, las fórmulas comunes para análisis hidro-climático se basan en la velocidad del viento medido a 2 m por sobre el nivel del terreno. Es por esto por lo que se realizó una corrección en base a la ley logarítmica del perfil de velocidad de viento (Campbell y Norman, 1998), considerando una altura de desplazamiento cero de 8 cm y el parámetro de rugosidad de 1.5 cm. La ecuación resultante es:

$$v_2 = v_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

donde v_2 es la velocidad del viento a 2 m sobre el nivel del terreno, en m/s; v_z es la velocidad del viento a z metros sobre el nivel del terreno, en m/s; y z es la altura de medición sobre el nivel del terreno, en m, la cual en este caso corresponde a 10 m.

La red disponible para esta variable presentó una cobertura espacial y temporal muy limitada. De las estaciones identificadas, solo una contaba con más del 50 % de los datos y ocho con más del 25 % durante el período de análisis, por lo que la información fue insuficiente para realizar una regionalización directa a partir de estaciones.

4. Usos del Agua

El análisis del uso y aprovechamiento del recurso hídrico constituye un componente fundamental para el desarrollo de la Evaluación Regional del Agua, debido a que permite identificar las presiones ejercidas sobre la disponibilidad de agua y reconocer los principales sectores usuarios presentes en el territorio. Esta información constituye la base para la estimación de la demanda hídrica y su

posterior relación con la oferta disponible mediante los indicadores establecidos en la metodología de la ERA.

La revisión de los estudios previos permitió identificar dos tipos principales de información. Por una parte, se dispone de registros de concesiones y captaciones de agua, que permiten identificar aprovechamientos individuales y, dependiendo del estudio, su localización, fuente de abastecimiento, uso y caudal asociado. Por otra parte, algunos POMCA presentan estimaciones de demanda hídrica para sus respectivas unidades de análisis, diferenciando los principales sectores usuarios del recurso.

Esta información constituye un antecedente importante para la caracterización de los usos del agua en la jurisdicción. Sin embargo, presenta diferencias en cuanto al periodo de referencia, nivel de detalle, metodología y unidad espacial de análisis. Adicionalmente, no todas las subzonas hidrográficas de la jurisdicción cuentan actualmente con POMCA, por lo que la disponibilidad de información no es homogénea para toda el área de estudio.

4.1. Información Disponible sobre el Uso del Agua

Como resultado de la revisión documental se consolidó la información sobre concesiones y aprovechamientos de agua reportada en los diferentes POMCA. Los registros disponibles contienen, dependiendo del estudio, información relacionada con la localización de la captación, cuerpo de agua asociado, unidad hidrográfica, tipo de uso y caudal concesionado, lo que permite disponer de una primera aproximación a la distribución territorial de los aprovechamientos.

En total, a partir de los estudios previos se recopilaron 984 registros de concesiones de agua. La disponibilidad de estos registros presenta diferencias importantes entre los POMCA, como se resume en la Tabla 3.

Tabla 3 Registros de concesiones de agua recopilados e información disponible por POMCA.

POMCA	Registros de concesiones recopilados	Información identificada
Medio y Bajo Suárez	700	Concesiones, captaciones y demanda hídrica
Sogamoso	161	Concesiones y demanda hídrica
Lebrija Medio	45	Concesiones y demanda hídrica
Directos al Magdalena Medio	45	Concesiones y demanda hídrica
Carare Minero	23	Concesiones y demanda hídrica
Opón	7	Concesiones y demanda hídrica
Afluentes Lebrija Medio	3	Concesiones y demanda hídrica
Total	***984***	

Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por CAS.

La mayor cantidad de registros recopilados corresponde al POMCA de Medio y Bajo Suárez, seguido por Sogamoso, mientras que los demás estudios presentan cantidades considerablemente menores. Esta diferencia no debe interpretarse directamente como una mayor o menor intensidad de uso del agua entre las cuencas, debido a que la cantidad de información disponible depende también del alcance, las fuentes consultadas, la fecha de elaboración y el nivel de detalle alcanzado en cada POMCA.

Los registros recopilados muestran una diversidad importante en los usos del recurso. Entre las categorías identificadas se encuentran el abastecimiento doméstico, riego y silvicultura, uso industrial y usos mixtos, entre otros. Asimismo, para numerosos registros se dispone del cuerpo de agua asociado y del caudal concesionado, permitiendo relacionar espacialmente los aprovechamientos con la red hídrica y las unidades hidrográficas correspondientes.

Además de las concesiones individuales, algunos POMCA contienen inventarios específicos de captaciones e infraestructura de abastecimiento. Estos antecedentes complementan la información administrativa de las concesiones y permiten conocer con mayor detalle la forma en que se realiza el aprovechamiento del recurso en determinadas unidades hidrográficas. No obstante, debido a que corresponden al periodo de elaboración de cada estudio, su utilización para la ERA requiere verificar previamente su vigencia.

De manera complementaria, los POMCA contienen estimaciones de demanda hídrica agregadas para diferentes unidades hidrográficas. A diferencia de los registros de concesiones, estas estimaciones no representan aprovechamientos individuales, sino cálculos de la cantidad de agua requerida por los diferentes sectores usuarios dentro de una determinada unidad de análisis.

La información recopilada diferencia categorías de demanda doméstica, agrícola, pecuaria y avícola, generación de energía, industrial, comercial y de servicios, hidrocarburos, piscicultura, usos mixtos y minería, entre otras. Algunos estudios incluyen además estimaciones relacionadas con la preservación de flora y fauna y diferencian determinadas condiciones hidrológicas.

Estas estimaciones constituyen un antecedente de especial interés para la ERA, ya que permiten identificar los principales sectores consumidores y reconocer diferencias en la composición de la demanda entre unidades hidrográficas. Sin embargo, fueron desarrolladas en el marco de diferentes POMCA y, por tanto, pueden corresponder a distintos periodos de referencia, fuentes de información y procedimientos de cálculo. Por esta razón, los valores disponibles no deben agregarse directamente ni interpretarse como una estimación actual de la demanda total de la jurisdicción sin realizar previamente un proceso de revisión y homologación.

4.2. Cobertura y Vacíos de Información

Una de las principales limitaciones identificadas corresponde a la cobertura territorial de la información disponible. Debido a que una parte importante de los antecedentes sobre demanda proviene de los POMCA, la disponibilidad de información se concentra en las subzonas hidrográficas que cuentan con este instrumento de planificación.

En consecuencia, las subzonas hidrográficas que aún no cuentan con POMCA presentan vacíos de información sobre la magnitud y distribución de las demandas hídricas. Esta condición es particularmente importante para la ERA, debido a que la evaluación requiere una representación consistente del uso del agua para toda la jurisdicción y no únicamente para las cuencas que han sido objeto de procesos previos de ordenación.

Por esta razón, la información recopilada debe entenderse como una línea base de antecedentes y no como un inventario completo y actualizado de los usos y demandas de agua en la jurisdicción de la CAS. Para las subzonas sin POMCA será necesario recurrir a otras fuentes de información que permitan estimar los usos existentes bajo criterios comparables con el resto del territorio.

La disponibilidad espacial de información puede representarse en la Figura 24, diferenciando las subzonas hidrográficas que cuentan con antecedentes de demanda derivados de POMCA y aquellas donde se identifican vacíos de información.

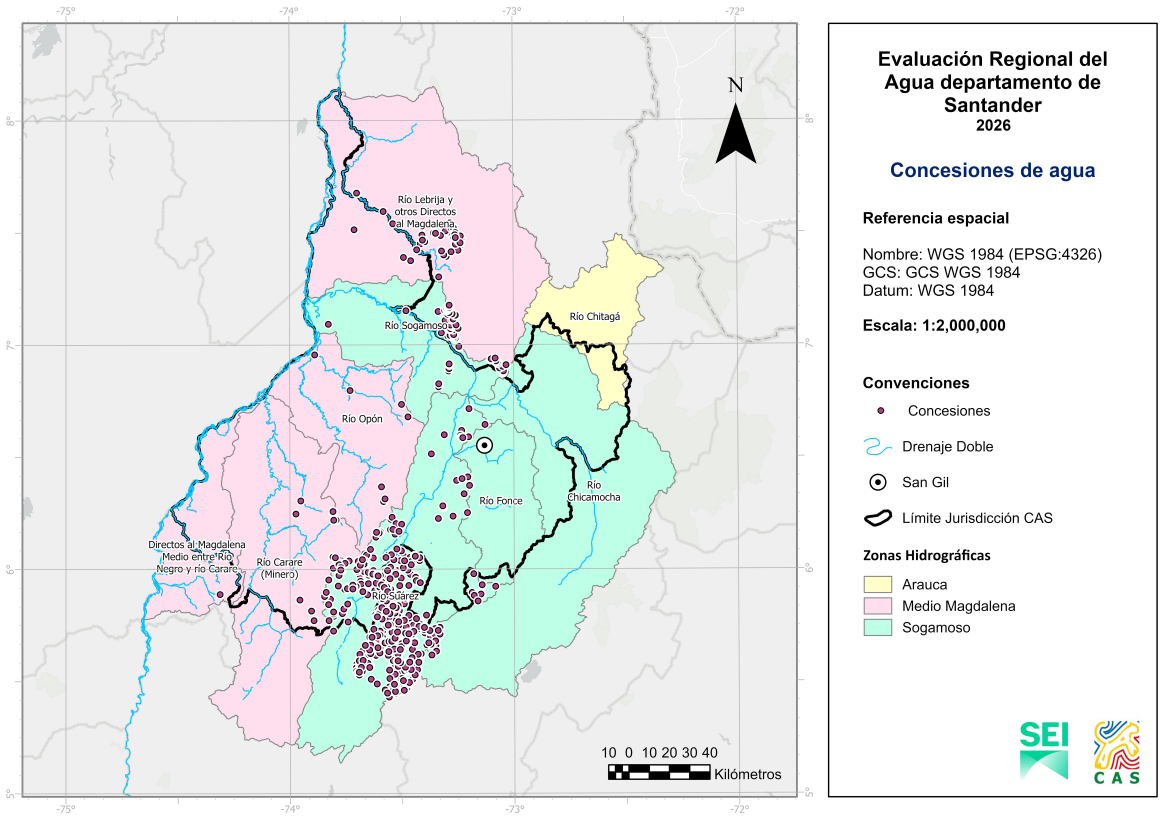


Figura 24 Disponibilidad de información sobre concesiones de agua en las subzonas hidrográficas de la jurisdicción de la CAS.
Fuente: Elaboración propia a partir de la información recopilada de los POMCA revisados.

Adicionalmente, para el desarrollo de la ERA será necesario complementar los antecedentes identificados con la información vigente de concesiones y aprovechamientos disponible en la CAS, con el propósito de verificar la actualidad de los registros existentes e incorporar aprovechamientos que hayan sido otorgados o modificados posteriormente a la elaboración de los POMCA.

La consolidación de estas fuentes permitirá construir una base homogénea de demandas para toda la jurisdicción, utilizando criterios metodológicos comunes y procurando representar adecuadamente los principales sectores usuarios del recurso. Posteriormente, esta información podrá asociarse con las unidades hidrográficas y fuentes de abastecimiento consideradas en el modelo WEAP, permitiendo analizar conjuntamente la disponibilidad y los requerimientos de agua.

En síntesis, los estudios previos proporcionan una base importante para reconocer los usos existentes y recuperar estimaciones de demanda previamente desarrolladas. Sin embargo, el principal reto para la ERA consiste en actualizar y homologar esta información y, especialmente, completar los vacíos existentes en las subzonas hidrográficas que aún no cuentan con POMCA, de manera que la caracterización de la demanda sea consistente para el conjunto de la jurisdicción de la CAS.

5. Calidad del Agua

La caracterización de la calidad del agua constituye uno de los componentes fundamentales de la Evaluación Regional del Agua, debido a que permite analizar las condiciones de los cuerpos hídricos y las presiones asociadas a las actividades humanas desarrolladas en el territorio. A diferencia de los análisis asociados exclusivamente con la disponibilidad del recurso, la evaluación de la calidad requiere integrar información proveniente del monitoreo de variables físicas, químicas y microbiológicas con aquella relacionada con vertimientos y cargas contaminantes.

Para el desarrollo de la ERA en la jurisdicción de la CAS se realizó una revisión de la información disponible en estudios previos, principalmente en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y otros instrumentos de planificación del recurso hídrico, complementada con la información disponible de estaciones de monitoreo del IDEAM. Esta revisión permitió identificar antecedentes de monitoreo de calidad del agua, campañas de muestreo, estimaciones del Índice de Calidad del Agua (ICA), análisis del Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL) e información asociada con fuentes de contaminación y vertimientos.

Los antecedentes disponibles muestran que existe una cantidad importante de información previamente generada en la jurisdicción. Sin embargo, su disponibilidad y nivel de detalle no son homogéneos entre cuencas y estudios. En algunos casos se dispone de resultados de laboratorio y campañas de monitoreo claramente identificadas, mientras que en otros únicamente se presentan resultados procesados, gráficas o indicadores finales, sin que se encuentren disponibles las bases de datos utilizadas para su cálculo. Estas diferencias condicionan la posibilidad de integrar directamente la información histórica en el desarrollo de la ERA y hacen necesaria una revisión detallada de su trazabilidad.

5.1. Información disponible sobre calidad del agua

La revisión de los estudios previos permitió identificar información de calidad del agua para varias de las principales cuencas de la jurisdicción. En términos generales, los antecedentes corresponden a dos fuentes principales: por una parte, las estaciones y campañas históricas de monitoreo realizadas por el IDEAM y, por otra, los monitoreos específicos desarrollados durante la formulación de los POMCA.

La información disponible presenta diferencias importantes en cuanto al número de puntos, periodos analizados y condiciones hidrológicas consideradas. En algunos POMCA se realizaron campañas específicas diferenciando condiciones secas y normales, lo que permite analizar variaciones temporales de la calidad del recurso.

En el POMCA del río Sogamoso, por ejemplo, se reporta una campaña de monitoreo de cuerpos de agua superficial en 23 puntos, con mediciones realizadas en marzo de 2016 para representar condiciones secas y en agosto del mismo año para condiciones normales. A partir de esta información se calculó el ICA y se identificaron diferencias espaciales en la condición de calidad del agua.

Para el POMCA del río Medio y Bajo Suárez se identificó información de la red de monitoreo de calidad del agua del IDEAM para el periodo 2010-2015, con excepción de 2014, así como campañas y variables fisicoquímicas utilizadas para caracterizar la condición de los cuerpos de agua. El estudio también

incorpora información proveniente de expedientes de la CAS y Corpoboyacá relacionada con permisos de vertimiento, PSMV, PGIRS y caracterizaciones de agua.

En el POMCA del río Opón se utilizaron estaciones de calidad del agua del IDEAM como referencia y se desarrolló adicionalmente una campaña propia de monitoreo en 27 puntos, distribuidos en unidades hidrográficas de segundo nivel subsiguiente. Los resultados de laboratorio fueron organizados para condiciones normales y secas. El estudio señala, además, que la cobertura espacial de las estaciones del IDEAM no era suficiente para caracterizar adecuadamente la cuenca, razón por la cual los registros de esta entidad fueron empleados principalmente como referencia para contrastar los resultados obtenidos durante el desarrollo del POMCA.

En el POMCA del río Carare Minero se identificó igualmente información de la red de monitoreo del IDEAM y resultados de comisiones de calidad del agua correspondientes a los años 2010, 2011, 2012, 2013 y 2015. Estos antecedentes fueron complementados con campañas desarrolladas en el marco del estudio y con información procedente de expedientes de Corpoboyacá, CAS y CAR, incluyendo permisos de vertimiento, PSMV, PGIRS y caracterizaciones de agua.

Para Afluentes Directos al río Lebrija Medio se reportan monitoreos de agua superficial realizados durante 2016. El estudio indica campañas en condiciones secas, correspondientes a marzo, y normales, correspondientes a agosto, además de la existencia de certificados de laboratorio asociados.

En Lebrija Medio también se dispone de antecedentes históricos y campañas específicas de monitoreo. Entre ellos se identifican registros de las estaciones San Rafael y Vanegas para el periodo 2005-2015, provenientes del IDEAM y la CDMB, además de monitoreos de aguas superficiales desarrollados durante 2016.

Finalmente, para Directos al Magdalena Medio se identificaron registros históricos de calidad del agua correspondientes al periodo 2011-2016, además de una campaña de monitoreo de aguas superficiales desarrollada en 2017, cuyos resultados son referenciados dentro de los anexos digitales del POMCA.

La información identificada se resume en la Tabla 4.

Tabla 4 Disponibilidad de información de calidad del agua e índices ICA e ICAL por POMCA.

Estudio / POMCA	Información de calidad identificada	Periodo/campaña relevante	ICA	IACAL
Río Sogamoso	Monitoreo de aguas superficiales	Marzo y agosto de 2016	Sí	Sí
Medio y Bajo Suárez	Red IDEAM y monitoreo del estudio	IDEAM 2010-2015; campaña 2016	Sí	Sí
Río Opón	Red IDEAM y monitoreo en 27 puntos	Marzo y julio de 2016	Sí	Sí
Carare Minero	Red IDEAM y campañas de monitoreo	IDEAM 2010-2015; campaña posterior	Sí	Sí
Afluentes Directos al río Lebrija Medio	Monitoreo de aguas superficiales	Marzo y agosto de 2016	Sí	Sí
Lebrija Medio	Registros históricos y monitoreo de aguas	2005-2015 y campañas de 2016	Sí	Sí

	superficiales			
Directos al Magdalena Medio	Registros históricos y monitoreo de aguas superficiales	2011-2016 y campaña 2017	Por verificar*	Por verificar*

*Nota: *La revisión consolidada identifica información de calidad del agua para Directos al Magdalena Medio, pero no permite establecer con el mismo nivel de detalle que los demás estudios la disponibilidad de los insumos requeridos para reproducir los indicadores.*
Fuente: Elaboración propia a partir de la información suministrada por la CAS.

En conjunto, los antecedentes muestran que existe una base importante de información de calidad del agua, particularmente en las cuencas que cuentan con POMCA. Sin embargo, las campañas corresponden principalmente a periodos comprendidos entre 2010 y 2017 y fueron desarrolladas bajo diferentes diseños de monitoreo. Por esta razón, los resultados constituyen un antecedente valioso para reconocer las condiciones históricas y sectores con posibles problemáticas de calidad, pero requieren ser complementados con información más reciente para caracterizar las condiciones actuales.

5.2. Antecedentes de los indicadores ICA e IACAL

Los estudios revisados muestran una aplicación relativamente amplia del Índice de Calidad del Agua (ICA) y del Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL). Ambos indicadores aportan información complementaria: mientras el ICA permite sintetizar las condiciones observadas a partir del monitoreo de los cuerpos de agua, el IACAL permite analizar la presión potencial ejercida por las cargas contaminantes sobre la oferta hídrica disponible.

Para el río Sogamoso, los resultados del ICA muestran diferencias entre las campañas realizadas en condiciones secas y normales. En condiciones secas se identificaron sectores con calidad aceptable y otros con calidad regular, mientras que durante condiciones normales se reportaron sectores con buena calidad en las partes altas de algunos municipios, condiciones regulares en áreas de influencia de Barrancabermeja y del área metropolitana de Bucaramanga y condiciones aceptables en otros sectores de la cuenca.

En el caso del Medio y Bajo Suárez, el cauce principal presenta, en términos generales, una condición regular, mientras que en sus tributarios predominan condiciones entre regular y aceptable. Para esta cuenca se utilizaron antecedentes de la red IDEAM correspondientes a 2010-2015 y una campaña de monitoreo desarrollada durante 2016.

Para el río Opón, los resultados muestran una variación importante entre condiciones hidrometeorológicas. Durante condiciones secas predominan categorías entre aceptable y regular, con algunos sectores clasificados como malos, mientras que durante condiciones normales se presenta una mejora hacia condiciones buenas y aceptables en una mayor proporción de la cuenca.

En Afluentes Directos al río Lebrija Medio, los antecedentes indican en términos generales condiciones favorables, aunque con diferencias espaciales y entre campañas. En condiciones normales se reportan sectores con calidad buena, regular y aceptable, mientras que durante condiciones secas predomina la categoría aceptable.

Para Lebrija Medio, los registros históricos y las campañas revisadas muestran principalmente condiciones entre regular y aceptable. La estación San Rafael presenta predominantemente una condición regular durante el periodo histórico analizado, aunque con variaciones entre años.

Estos resultados permiten identificar que la condición de calidad del agua no es uniforme dentro de la jurisdicción y puede presentar variaciones importantes tanto espacialmente como entre periodos hidrológicos. Sin embargo, dado que los monitoreos corresponden a diferentes años, metodologías y diseños de muestreo, no resulta apropiado realizar una comparación directa entre los valores de ICA de los diferentes POMCA sin efectuar previamente un proceso de homologación de la información.

En relación con el IACAL, los antecedentes disponibles muestran que varias de las cuencas cuentan con estimaciones de cargas contaminantes asociadas principalmente con DBO_5, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). Para su estimación se utilizaron diferentes fuentes de información, incluyendo PSMV, permisos de vertimiento, tasas retributivas, expedientes de las autoridades ambientales e información sectorial.

Los resultados históricos muestran además que determinadas cuencas presentan presiones importantes. En el río Opón, por ejemplo, los antecedentes indican presiones altas asociadas a cargas contaminantes y un incremento de la alteración potencial bajo condiciones de año seco. En Afluentes Directos al río Lebrija Medio se reportan igualmente categorías altas y muy altas en diferentes unidades hidrográficas, mientras que Lebrija Medio presenta diferencias importantes entre sus unidades de análisis. Para Medio y Bajo Suárez se identifican subcuencas con mayor afectación antrópica y para Sogamoso los resultados varían espacialmente, aumentando la alteración potencial durante condiciones hidrológicas secas.

Estos antecedentes resultan particularmente útiles para identificar sectores donde históricamente se han reconocido mayores presiones sobre la calidad del agua, pero las cargas deberán ser revisadas y actualizadas para representar las condiciones actuales de la jurisdicción.

5.3. Limitaciones y vacíos de la información disponible

A pesar del volumen de información identificado, la revisión realizada evidencia limitaciones importantes para su incorporación directa en la ERA. Una de las principales corresponde a que la existencia de resultados de calidad del agua en los documentos no garantiza la disponibilidad de los datos numéricos originales utilizados para su cálculo.

Esta situación se evidencia particularmente en la información de algunos POMCA y PORH disponible actualmente en el geoportal de la CAS. Como resultado de la revisión documental complementaria realizada al material disponible, en la Tabla 5 registran las principales limitaciones identificadas por estudio.

Tabla 5 Limitaciones identificadas en la información disponible por estudio

Estudio	Limitación identificada
PORH río Fonce	Se identifican 27 estaciones de monitoreo y resultados de ICA, pero no se encuentra disponible la tabla o base de datos con los valores numéricos de los parámetros utilizados para calcularlo. Los resultados aparecen principalmente de forma gráfica. Tampoco se encontraron los Anexos 29 y 29A, correspondientes a

	resultados de laboratorio de las campañas de mayo y agosto.
PORH La Gómez	Se presentan diferentes datos correspondientes a un mismo año, pero no se identifica claramente el mes en el cual fueron realizadas las mediciones.
POMCA río Sogamoso	Para parte de la información histórica consultada se identifica el año del monitoreo, pero no siempre el mes de realización; adicionalmente, algunos determinantes se presentan sin especificar sus unidades.
POMCA río Opón	Para parte de los monitoreos históricos se identifica el año, pero no el mes, y algunos determinantes se presentan sin sus respectivas unidades.
POMCA Afluentes Directos al río Lebrija Medio	Se identificaron determinantes de calidad reportados sin especificación de sus unidades.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante diferenciar estas limitaciones de la información general reportada en los documentos. Por ejemplo, para Sogamoso y Opón los POMCA sí permiten identificar campañas específicas realizadas durante 2016 bajo determinadas condiciones hidrológicas; la limitación señalada corresponde a parte de la información histórica o de detalle disponible en los archivos revisados, donde la fecha o las unidades de determinados parámetros no siempre pueden ser reconstruidas adecuadamente. Esta distinción evita interpretar la ausencia de metadatos en determinados registros como ausencia total de información temporal.

Para el PORH del río Fonce, la ausencia de los resultados numéricos adquiere especial importancia. Aunque el documento presenta resultados del ICA para 27 estaciones, la disponibilidad únicamente gráfica del indicador limita la posibilidad de recuperar los valores originales de los parámetros, verificar el cálculo y utilizar directamente los monitoreos en nuevos análisis. Por esta razón, resulta prioritario solicitar las bases de datos y los anexos de laboratorio correspondientes a las campañas mencionadas en el estudio.

De manera general, las principales necesidades de complementación corresponden a la disponibilidad de los resultados originales de laboratorio, fechas completas de muestreo, unidades de medida, coordenadas de los puntos, identificación del cuerpo de agua y metadatos asociados a cada campaña. Estos elementos son indispensables para construir una base homogénea que permita integrar registros provenientes de diferentes fuentes y periodos.

Adicionalmente, una parte importante de los antecedentes corresponde a monitoreos realizados hace varios años. Aunque esta información conserva valor para analizar antecedentes y posibles tendencias, deberá complementarse con los registros más recientes disponibles en la CAS, IDEAM y otras fuentes pertinentes para evitar que la caracterización actual dependa exclusivamente de campañas desarrolladas durante la formulación de los POMCA.

6. Riesgos Asociados al Recurso Hídrico

La gestión integral del recurso hídrico requiere considerar no solamente las condiciones medias de oferta, demanda y calidad, sino también aquellas situaciones que pueden comprometer temporal o espacialmente la disponibilidad del agua o generar afectaciones sobre la población, la infraestructura y los ecosistemas. En este contexto, los estudios previos revisados incorporan diferentes análisis relacionados con la vulnerabilidad frente al desabastecimiento y con la ocurrencia potencial de eventos torrenciales.

Para el desarrollo de la Evaluación Regional del Agua, estos antecedentes resultan útiles para reconocer sectores donde previamente se han identificado condiciones de mayor vulnerabilidad. Sin embargo, los resultados fueron obtenidos en diferentes POMCA y mediante unidades espaciales particulares, por lo que deben ser considerados principalmente como información de referencia y no como una evaluación homogénea del riesgo para toda la jurisdicción.

La información recopilada muestra que los principales indicadores asociados con este componente son el Índice de Vulnerabilidad Hídrica por Desabastecimiento (IVH) y el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET). El primero relaciona las condiciones de regulación hídrica y presión por uso del agua, mientras que el segundo integra características morfométricas y de variabilidad hidrológica para identificar unidades con mayor susceptibilidad frente a eventos torrenciales.

6.1. Vulnerabilidad por Desabastecimiento

La información disponible en los POMCA muestra que el IVH ha sido calculado para diferentes cuencas utilizando como insumos principales el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) y el Índice de Uso del Agua (IUA), considerando generalmente condiciones de año normal y año seco. Los resultados históricos evidencian diferencias importantes entre las cuencas.

En el río Sogamoso, el análisis reporta una mayor cantidad de unidades hidrográficas clasificadas en categoría alta durante condiciones secas. En año normal se identificaron 21 unidades con vulnerabilidad alta y 17 con vulnerabilidad media, mientras que en año seco el número de unidades con vulnerabilidad alta aumentó a 30.

Para Medio y Bajo Suárez, la cuenca fue clasificada en términos generales con IVH bajo, indicando una susceptibilidad relativamente reducida al desabastecimiento. No obstante, los antecedentes identifican al sector del río Moniquirá y algunas microcuencas abastecedoras como las zonas de mayor sensibilidad relativa dentro de la cuenca.

En el río Opón, el IVH fue clasificado como medio tanto para condiciones normales como secas, lo que representa una vulnerabilidad moderada frente a situaciones extremas de disminución de la disponibilidad hídrica.

Para Afluentes Directos al río Lebrija Medio, los antecedentes muestran una mayor sensibilidad frente a condiciones secas. En año normal, aproximadamente 92,7 % del área presenta vulnerabilidad media, mientras que en año seco aumentan las categorías alta y muy alta, alcanzando esta última aproximadamente 31,2 % del área total.

Estos resultados evidencian que la vulnerabilidad al desabastecimiento puede modificarse de manera importante entre condiciones hidrológicas normales y secas. Esta diferencia resulta particularmente relevante para la ERA, dado que el análisis de condiciones promedio puede ocultar sectores donde la disponibilidad de agua se reduce significativamente durante periodos secos.

Tabla 6 Antecedentes de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento identificados en los POMCA revisados.

POMCA	Condición general identificada	Observación principal

Sogamoso	Media–Alta	Incremento importante de unidades con vulnerabilidad alta en año seco
Medio y Bajo Suárez	Baja	Mayor susceptibilidad relativa en río Moniquirá y algunas microcuencas abastecedoras
Opón	Media	Vulnerabilidad moderada tanto en año normal como seco
Afluentes Lebrija Medio	Media, con incremento en año seco	En condiciones secas aumentan las categorías alta y muy alta
Otros POMCA	Información por complementar	La matriz consolidada no presenta el mismo nivel de detalle para todas las cuencas

Fuente: Elaboración propia a partir de la información recopilada de los POMCA revisados.

La información disponible constituye un antecedente importante para identificar unidades con mayor sensibilidad histórica al desabastecimiento. Sin embargo, los valores deberán ser actualizados durante el desarrollo de la ERA utilizando una metodología homogénea y los nuevos resultados de oferta, demanda y regulación hídrica.

6.2. Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales

Los POMCA revisados incorporan también el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) como herramienta para identificar unidades hidrográficas cuyas características físicas e hidrológicas pueden favorecer respuestas rápidas y eventos de alta energía.

El índice se construye a partir de variables relacionadas con la morfometría de las cuencas y la variabilidad del régimen hidrológico, por lo que permite diferenciar unidades con distinta susceptibilidad frente a fenómenos torrenciales.

En el río Sogamoso, los antecedentes indican que la categoría predominante del IVET es alta, con 22 unidades hidrográficas clasificadas en esta condición. Las zonas identificadas con menor vulnerabilidad corresponden, entre otras, a la quebrada La Raíz, Caño La Jeringa, algunos directos al río Sogamoso y sectores asociados a las ciénagas San Silvestre y El Llanito.

Para el río Opón, las mayores condiciones de vulnerabilidad se identifican principalmente en las subcuencas de los ríos Opóncito y Honduras, mientras que presentan condiciones comparativamente menores sectores asociados a complejos cenagosos, la quebrada Agua Linda y algunos directos al río Opón.

En Afluentes Directos al río Lebrija Medio, el POMCA concluye que la vulnerabilidad a eventos torrenciales para el conjunto de la cuenca corresponde a una categoría media.

Los antecedentes de Carare Minero indican un predominio de condiciones altas de IVET, principalmente hacia el sector sur de la cuenca, asociado con una mayor variabilidad del drenaje y características morfométricas que favorecen respuestas torrenciales.

Por su parte, para Medio y Bajo Suárez se identificó el cálculo del IVET a nivel de unidades hidrográficas de segundo y tercer nivel subsiguiente, aunque la matriz consolidada no contiene una síntesis suficientemente detallada de los resultados como para establecer una condición general de toda la cuenca.

Estos resultados permiten reconocer que la susceptibilidad a eventos torrenciales presenta una distribución espacial heterogénea y está fuertemente condicionada por las características fisiográficas de cada unidad hidrográfica. En las zonas montañosas, la combinación de pendientes elevadas, cauces encajados y respuestas hidrológicas rápidas puede favorecer la ocurrencia de eventos de mayor intensidad.

No obstante, el IVET debe ser interpretado como un indicador de vulnerabilidad o susceptibilidad, y no como una estimación directa de amenaza o riesgo. Una evaluación integral del riesgo requiere incorporar adicionalmente información sobre exposición, elementos vulnerables, antecedentes de eventos y condiciones específicas de amenaza.

6.3. Cobertura y Limitaciones de la Información Disponible

La revisión muestra que la información relacionada con riesgos asociados al recurso hídrico se encuentra principalmente vinculada con las cuencas que cuentan con POMCA. En consecuencia, no existe todavía una caracterización homogénea para todas las subzonas hidrográficas de la jurisdicción.

Esta limitación es similar a la identificada para la demanda hídrica: las unidades que aún no cuentan con POMCA presentan un menor nivel de información sistematizada sobre vulnerabilidad al desabastecimiento y eventos torrenciales.

Adicionalmente, los resultados disponibles fueron obtenidos para diferentes periodos y niveles de desagregación espacial, por lo que no resulta apropiado construir un único mapa regional mediante la unión directa de los resultados históricos de cada POMCA.

La principal utilidad de estos antecedentes consiste en:

- Identificar unidades previamente reconocidas como sensibles
- Establecer metodologías e indicadores utilizados
- Reconocer sectores donde las condiciones secas incrementan significativamente la vulnerabilidad
- Disponer de resultados de referencia para contrastar los nuevos indicadores generados durante la ERA.

Para el desarrollo de la evaluación será necesario recalcular los indicadores bajo una base metodológica y espacial común, utilizando los resultados actualizados de oferta, regulación y demanda obtenidos mediante el modelo hidrológico.

En particular, el IVH podrá ser actualizado a partir de los nuevos resultados de IRH e IUA, permitiendo evaluar de manera homogénea la vulnerabilidad al desabastecimiento en las unidades hidrográficas consideradas en la ERA. De manera complementaria, la información de IVET disponible en los POMCA podrá ser utilizada como antecedente para identificar sectores con mayor susceptibilidad a respuestas torrenciales.

En síntesis, los estudios previos muestran que existen antecedentes importantes relacionados con desabastecimiento hídrico y eventos torrenciales, pero su cobertura y nivel de detalle no son uniformes en toda la jurisdicción. El desarrollo de la ERA permitirá avanzar hacia una evaluación

regional consistente, utilizando una misma estructura de información y criterios comunes para todas las unidades hidrográficas.

7. Conclusiones, Consideraciones y Recomendaciones

La revisión realizada evidencia que la jurisdicción de la CAS cuenta con una base amplia y diversa de información relacionada con el recurso hídrico, generada principalmente a través de POMCA, PORH, redes de monitoreo, bases de datos institucionales y estudios desarrollados por entidades como IDEAM, SGC e IGAC. No obstante, uno de los principales hallazgos del análisis es que la existencia de información no implica necesariamente su utilización directa en la ERA, debido a las diferencias existentes en periodos de referencia, escalas, unidades espaciales, metodologías y niveles de detalle.

La sistematización de estos antecedentes en una matriz consolidada de información disponible constituye un resultado importante de esta primera etapa, debido a que permite mantener la trazabilidad de las fuentes consultadas, identificar la información potencialmente utilizable y reconocer aquellos componentes que requieren actualización, procesamiento adicional o complementación. Esta matriz deberá mantenerse como un producto dinámico durante el desarrollo de la ERA, incorporando progresivamente la nueva información suministrada por la CAS y demás entidades.

En términos biofísicos, la información disponible permite establecer una base suficientemente sólida para la caracterización regional. Para componentes como relieve, geología, hidrogeología, suelos y coberturas de la tierra se identificaron fuentes oficiales con cobertura regional que pueden ser utilizadas bajo criterios homogéneos para toda la jurisdicción, complementando el mayor nivel de detalle disponible en determinados POMCA. En particular, el uso del DEM ALOS PALSAR de 12,5 m permitirá mantener una referencia topográfica común para los diferentes análisis que dependen de la elevación. Asimismo, para geología se propone utilizar como referencia regional la cartografía oficial del SGC, complementada con los estudios específicos desarrollados en los POMCA.

La caracterización hidrográfica evidenció además que varias de las unidades que tienen influencia sobre la jurisdicción trascienden los límites administrativos de la CAS. Esta condición deberá ser considerada durante la implementación del modelo hidrológico, diferenciando el área administrativa objeto de la evaluación de las áreas aportantes requeridas para representar correctamente la generación y transferencia de caudal.

En relación con la información climática, la red de estaciones del IDEAM proporciona una base importante para el desarrollo de la modelación, aunque su cobertura y continuidad varían considerablemente entre variables. La precipitación presenta la mayor disponibilidad espacial, mientras que variables como velocidad del viento y brillo solar cuentan con una cobertura más limitada. Por esta razón, la selección de estaciones para la modelación consideró criterios de continuidad y representatividad, y fue necesario implementar procedimientos específicos de depuración y relleno de datos.

Uno de los principales avances desarrollados específicamente para la ERA corresponde a la regionalización de las variables climáticas, mediante la cual la información puntual disponible fue transformada en productos espacialmente continuos para la jurisdicción. Se generaron productos de precipitación, temperatura, humedad relativa, fracción nubosa y velocidad del viento mediante metodologías diferenciadas según las características de cada variable. Estos productos constituyen

uno de los principales insumos para la implementación del modelo hidrológico y permiten superar parcialmente las limitaciones derivadas de la distribución irregular de las estaciones.

En contraste, la información relacionada con uso y aprovechamiento del recurso hídrico presenta mayores necesidades de actualización y homologación. Los POMCA proporcionan antecedentes importantes sobre concesiones, captaciones y estimaciones sectoriales de demanda, pero estos corresponden a diferentes periodos y metodologías y no pueden interpretarse directamente como una representación actual de la demanda total de la jurisdicción.

Adicionalmente, la disponibilidad de información sobre demanda se concentra en aquellas unidades hidrográficas que cuentan con POMCA. Las subzonas que aún no disponen de este instrumento presentan vacíos importantes sobre la magnitud y distribución de los usos del agua, por lo que será necesario recurrir a información adicional de la CAS y otras fuentes para garantizar una representación homogénea de la demanda en toda la jurisdicción.

Por esta razón, una de las actividades prioritarias de las siguientes etapas será la actualización de la base de concesiones y aprovechamientos, verificando la vigencia de los registros recopilados, incorporando nuevas concesiones y consolidando una metodología común para la estimación de las demandas sectoriales que posteriormente serán representadas en WEAP.

La revisión de la información de calidad del agua muestra igualmente una disponibilidad considerable de antecedentes. Los POMCA incluyen campañas de monitoreo, registros históricos del IDEAM, cálculos del ICA, estimaciones del IACAL e información sobre vertimientos y cargas contaminantes. Sin embargo, la información presenta diferencias importantes entre cuencas y, en algunos casos, los documentos contienen únicamente resultados procesados o representaciones gráficas sin disponer de las bases numéricas que sustentan los cálculos.

Esta situación limita la posibilidad de integrar directamente algunos resultados históricos en la nueva evaluación. Para el desarrollo de la ERA será necesario priorizar la recuperación de datos primarios de monitoreo, incluyendo resultados de laboratorio, fechas completas de muestreo, unidades, coordenadas, identificación de cuerpos de agua y demás metadatos que permitan establecer la trazabilidad y comparabilidad de los registros.

Entre los vacíos específicos identificados se encuentran los datos numéricos y anexos de laboratorio del PORH del río Fonce, así como inconsistencias o ausencia de información temporal y unidades en algunos registros de La Gómez, Sogamoso, Opón y Afluentes Directos al río Lebrija Medio. Estas solicitudes deberán ser gestionadas con la CAS para determinar si la información puede ser recuperada antes del cálculo de los indicadores de calidad.

En cuanto a los riesgos asociados al recurso hídrico, los antecedentes disponibles permiten reconocer sectores previamente identificados como vulnerables al desabastecimiento y a eventos torrenciales. Sin embargo, al igual que ocurre con la demanda, la cobertura de estos resultados está fuertemente condicionada por la existencia de POMCA y no constituye todavía una caracterización homogénea de toda la jurisdicción.

Los valores históricos del IVH y del IVET serán útiles principalmente como referencia y como elementos de contraste. Para la ERA será necesario recalcular los indicadores que correspondan utilizando una base metodológica y espacial común, de manera que las diferencias entre unidades

respondan a las condiciones actuales del territorio y no a metodologías o periodos diferentes empleados en los estudios previos.

7.1. Información prioritaria por complementar

A partir de la revisión desarrollada, se identifican algunas necesidades de información que deberán ser atendidas de manera prioritaria durante las siguientes etapas de la ERA:

1. Actualizar y completar la información de concesiones y aprovechamientos del agua, incluyendo registros posteriores a la elaboración de los POMCA y verificando su vigencia, localización, fuente de abastecimiento, uso y caudal autorizado.
2. Recuperar los datos primarios de calidad del agua disponibles en la CAS, particularmente resultados de laboratorio, fechas de monitoreo, unidades de medida y metadatos asociados a las campañas históricas.
3. Obtener los anexos y bases faltantes identificados durante la revisión de los PORH y POMCA, especialmente los resultados numéricos utilizados para el cálculo del ICA en el PORH del río Fonce y los anexos de laboratorio mencionados en dicho estudio.
4. Consolidar información vigente sobre vertimientos y cargas contaminantes, incluyendo permisos de vertimiento, PSMV, tasas retributivas y demás registros necesarios para actualizar el análisis del IACAL.
5. Continuar con la revisión y selección de los registros hidrológicos de caudal que puedan ser utilizados para la calibración y validación del modelo WEAP, considerando continuidad, representatividad espacial y calidad de las series.
6. Mantener actualizada la matriz consolidada de información disponible, incorporando las nuevas fuentes y productos que sean recibidos o desarrollados durante el estudio y conservando la trazabilidad entre los datos utilizados, sus fuentes y los resultados obtenidos.

En términos generales, el análisis desarrollado permite concluir que existe información suficiente para avanzar con la implementación de la ERA, particularmente en los componentes biofísico, climático e hidrológico. El principal desafío no corresponde a la ausencia generalizada de información, sino a la necesidad de integrar fuentes heterogéneas bajo una estructura común, actualizar determinados componentes y completar vacíos específicos, especialmente en demanda y calidad del agua.

La implementación del modelo hidrológico y el cálculo posterior de los indicadores permitirán avanzar desde esta etapa de recopilación y análisis documental hacia una representación integrada y homogénea del recurso hídrico en la jurisdicción. En este proceso, los resultados de los estudios previos deberán conservarse como antecedentes y elementos de contraste, mientras que los productos desarrollados específicamente para la ERA deberán garantizar criterios metodológicos consistentes para todas las unidades hidrográficas consideradas.