



El Marco del Árbol de Decisión: Aplicación a la Cuenca de Chancay-Lambayeque, Perú



Informe Final

El Marco del Árbol de Decisión: Aplicación a la Cuenca de Chancay-Lambayeque, Perú

Informe Final



Title
El Marco del Árbol de Decisión: Aplicación a la Cuenca de Chancay-Lambayeque, Perú

Client The World Bank, WASHINGTON DC 20433	Project 11203229-000	Attribute 11203229-000-ZWS-0017	Pages 177
---	--------------------------------	---	---------------------

Key words

Peru; climate change; climate risk; watershed Planning; water infrastructure

Summary

The Chancay-Lambayeque watershed faces the challenges of rapid population growth and economic development in the presence of inadequate water supply, flood risk and environmental degradation. This work applies the World Bank’s Decision Tree Framework (DTF) to assess the robustness and resiliency of the system to an uncertain future and to evaluate and prioritize intervention options for improvement. The study applies a step-wise approach to identify most important climate and nonclimate vulnerabilities for the system focusing on the shortages in the domestic and irrigation water supply and the frequency of critical discharge levels for flood control. In addition, a set of infrastructure interventions are considered including reservoirs, groundwater pumping and green-infrastructure. The results highlight potential benefits from the new investments as well the limitations in improving the resilience to an uncertain future.

Cite as:

Taner M.Ü., Hunink J.E., Contreras, S., Hajar A., Hamed R., Morales D., Wasti A., Ray, P. 2019. El Marco del Árbol de Decisión: Aplicación a la Cuenca de Chancay-Lambayeque, Perú. Informe final. Deltares, FutureWater, INSIDEO and University of Cincinnati para el Banco Mundial.

Acknowledgements

This work was commissioned and funded by the World Bank and the Korean Green Trust Fund. The current analysis was also supported by several technical staff of Deltares: Marnix van der Vat and Ad Jeuken. Analysis of natural infrastructure interventions presented in this report was carried out by RTI International, CONDESAN, Forest Trends, and researchers from Imperial College London, as part of the Natural Infrastructure for Water Security project, financed by the United States Agency for International Development and the Government of Canada. The opinions expressed herein are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the World Bank, Autoridad Nacional del Agua, U.S. Agency for International Development or the Canadian Government. This report and the previous versions have been reviewed by Otto de Keizer, Deltares.

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
1.0	Oct. 2019	M. Ümit Taner		Otto de Keizer		Harm Duel	
						Gerard Blom	

Status
final

Resumen ejecutivo

El Sistema de Recursos Hídricos de la Cuenca Chancay-Lambayeque es sistema complejo que enfrenta a importantes desafíos debidos al rápido crecimiento poblacional, un desarrollo económico en un contexto de escasez de agua, y el aumento del riesgo de inundaciones y de degradación ambiental. La Autoridad Nacional del Agua, ANA, publicó en 2015 el Plan de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) con el objeto de promover el desarrollo y la gestión coordinada y sostenible de los recursos hídricos del sistema Chancay-Lambayeque. Ese mismo año, ProInversión aceptó un proyecto para considerar nuevas infraestructuras de agua en el sistema, la rehabilitación de la infraestructura existente y la expansión de las áreas agrícolas bajo riego. Si bien estos esfuerzos de planificación se alzan como una oportunidad hacia la gestión integrada de los recursos hídricos, también existe una importante necesidad por evaluar a nivel de cuenca los riesgos a medio-largo plazo que se derivan del crecimiento poblacional, los cambios de uso de suelo, y el cambio climático.

Este trabajo aplica el Marco de Árbol de Decisiones (DTF, por sus siglas en inglés) desarrollado por el Banco Mundial para evaluar la solidez y resiliencia del sistema Chancay-Lambayeque a un futuro incierto, y guiar y priorizar las opciones de intervención más costo-efectivas. El DTF es un proceso pragmático de toma de decisiones para la evaluación de riesgos en el ámbito de los recursos hídricos y cuya utilidad se ha demostrado, entre otros casos, en Upper Arun (Nepal), Mwache (Kenia), Cutzamala (México). El DTF consiste en un proceso en cascada integrado por cuatro fases, en el que cada fase, a excepción de la primera, se activa solo si es necesario. La primera fase tiene por objetivo definir y describir el contexto del análisis, incluidas las posibles incertidumbres climáticas y no climáticas para la región de estudio, los indicadores de desempeño a considerar, los umbrales críticos de desempeño para el sistema, y las opciones de adaptación. La fase II (Análisis Inicial) utiliza técnicas sencillas de análisis de sensibilidad para identificar los factores de incertidumbre más importantes para el sistema de interés sobre la base de los indicadores de desempeño y los umbrales especificados. Si se determina que el sistema es sensible, se lleva a cabo un Análisis de Estrés Climático (Fase III). En esta fase, el sistema de recursos hídricos se somete a pruebas de estrés para una amplia gama de escenarios futuros posibles, y se calculan los indicadores de desempeño para cada escenario planteado. Si se confirma la sensibilidad del sistema a los diferentes escenarios y factores de incertidumbre, se realiza un análisis de Gestión de Riesgos Climáticos (Fase IV) para evaluar cómo diferentes opciones de intervención mejoran el desempeño del sistema en términos de robustez y resiliencia.

Fase I - Selección del proyecto

La aplicación del DTF a Chancay-Lambayeque comenzó con los dos talleres de inicio celebrados en las regiones de Chiclayo (enero de 2019) y Cajamarca (febrero de 2019), respectivamente. Durante los talleres, el equipo de consultores se reunió con los representantes de ANA, el gobierno local y los grupos de interés locales para definir el alcance y los objetivos del estudio y las características clave del análisis.

Se acordó que el análisis se centraría en los tres problemas clave siguientes:

- Déficit en el suministro de agua para satisfacer la demanda actual y proyectada de población en las provincias de Chiclayo, Lambayeque, Chongoyape y Saltur-Sipán-San Martín.
- Déficit en el suministro de agua para satisfacer la demanda actual y proyectada de riego dentro del sistema de recursos hídricos Chancay-Lambayeque. Riesgo de inundación en las zonas pobladas del sistema Chancay-Lambayeque.

En relación con estos problemas, se especificaron los siguientes objetivos o umbrales de desempeño:

- El sistema debe satisfacer al menos el 95% del total de la demanda de agua poblacional.
- El sistema debe satisfacer al menos el 80% del total de la demanda de agua de riego de la cuenca.
- Se adopta un valor de caudal de 300 m³/s medido en la estación de aforos de Racarumi como nivel crítico de referencia para la alerta y control de inundaciones.

Los principales componentes del análisis se especificaron de acuerdo al marco de las 4Cs del DTF: Consecuencias (indicadores para cuantificar el desempeño del sistema), incertidumbres (factores de incertidumbre que pueden afectar el desempeño del sistema), las opciones (opciones de intervención para mejorar el desempeño del sistema), y las Conexiones (modelos para simular cómo funciona y responde el sistema a los factores de incertidumbre y las opciones de intervención).

- *Consecuencias* (indicadores de desempeño). Se definen en términos de confiabilidad y vulnerabilidad del sistema para satisfacer la demanda de agua poblacional y de riego, y del intervalo de retorno del nivel de caudal crítico en la estación de Racarumi (300 m³/s). También se han considerado los indicadores de robustez y resiliencia para resumir el desempeño del sistema bajo una amplia gama de condiciones y escenarios futuros.
- *incertidumbres*. Se especifican como cambios en la temperatura y precipitación media anual, cambios en la precipitación durante la estación húmeda, cambios en la demanda de agua de riego, acumulación de sedimentos en la presa de Tinajones, y transferencias de agua entre cuencas a través de los trasvases de Chotano y Conchano.
- *opciones*. Se ha identificado la Presa Sicán, Presa La Montería, Uso de agua subterránea e Infraestructura Natural. Estas cuatro opciones de intervención se seleccionaron de manera consensuada con actores y agentes locales a partir de una lista inicial con diez posibles actuaciones referidas en diferentes planes y proyectos de infraestructuras existentes para la región.
- *Conexiones (modelos)*. Se han empleado tres modelos: un generador de clima, un modelo hidrológico semidistribuido de base empírica (HydroBID), y un modelo de evaluación y asignación de recursos hídricos (WEAP).

Fase II - Análisis inicial

En la fase II, se realizó un rápido análisis para evaluar la sensibilidad del sistema a cambios futuros y clasificar las incertidumbres en función de su relevancia.

- Para el objetivo del riesgo de suministro de agua, se sigue un procedimiento de análisis de sensibilidad de tres pasos. Primero, cada uno de los siete factores de incertidumbre, climáticos y no climáticos, se modifican gradualmente a lo largo de un rango de valores

suficientemente amplio para calcular a posteriori los indicadores de desempeño del sistema. Los resultados se tradujeron en términos de elasticidad (tasa de variación en el indicador de desempeño en relación con la variación del factor de incertidumbre). Finalmente, se estimaron los rangos de desempeño plausibles en base a los valores de elasticidad y los rangos de incertidumbre plausibles especificados. **Encontramos que la confiabilidad del sistema para satisfacer la demanda de agua poblacional es generalmente insensible a cambios futuros, ya que el objetivo de confiabilidad del 95% se cumple en todas las condiciones. Por otra parte, el sistema mostró una alta vulnerabilidad y sensibilidad a las incertidumbres futuras en términos de confiabilidad para satisfacer la demanda de agua de riego mostró una.** Para la confiabilidad del riego, los rangos de desempeño plausibles se estiman en 40-70 % para cambios en la demanda de riego, 50-100% para cambios en la precipitación media, y 68-75% para cambios en la temperatura media. Para el objetivo del riesgo de inundación, se realiza un análisis de sensibilidad similar mediante: i) el análisis de los valores de los caudales extremos diarios en la estación de medición de Racarumi, ii) el análisis de la relación entre los caudales extremos diarios y las precipitaciones y, por último, iii) el análisis de sensibilidad de los caudales extremos a los cambios en la precipitación media anual. **Encontramos que los caudales extremos diarios son altamente sensibles a los cambios en la precipitación media.** El nivel de caudal crítico (300 m³/s) tiene un período de retorno de 9.3 años bajo condiciones climáticas históricas. El período de retorno calculado fue de 39 años bajo un futuro seco plausible (reducción de la precipitación media anual del 35%), y 5 años bajo un futuro húmedo plausible (aumento de la precipitación del 32%).

Fase III - Prueba de Estrés Climático

En la Fase III, se realizó una prueba de estrés para tener una comprensión más profunda de las posibles condiciones que pueden causar desempeños no aceptables. Se consideraron tres incertidumbres climáticas (variabilidad natural y cambios en la temperatura y precipitación media anual), así como la incertidumbre relacionada con el nivel de desarrollo futuro y expansión de la superficie de riego. La prueba de estrés se llevó a cabo primero generando un gran número de futuros (por muestreo de condiciones climáticas y no climáticas), y luego simulando el sistema bajo cada uno de esos futuros. Los resultados son finalmente presentados en términos de indicadores de desempeño, y de robustez y resiliencia. Basándonos en el análisis, se concluye:

- **La confiabilidad para satisfacer la demanda de agua poblacional es insensible a cambios futuros (de clima y expansión de la superficie de riego).** El umbral de confiabilidad del 95% puede cumplirse bajo la mayoría de las condiciones futuras, excepto cuando la precipitación media se reduce en un 35% o más, lo que es improbable si se tienen en cuenta las proyecciones climáticas para el 2050.
- **La confiabilidad para la satisfacer la demanda de agua de riego es muy sensible a cambios futuros (de clima y expansión de la superficie de riego).** El objetivo de confiabilidad del 80% sólo puede alcanzarse con los niveles de demanda históricos y un estrecho rango de futuros húmedos (aumento de la precipitación del 10% o más). Para el nivel de demanda proyectada para el horizonte 2035, el umbral de confiabilidad nunca podrá ser alcanzado, incluso bajo futuros muy húmedos (aumento de la precipitación del 40%).
- **El intervalo de recurrencia del nivel crítico de descarga en la estación de Racarumi depende en gran medida de los cambios futuros en las precipitaciones.** Se calcula que es de aproximadamente 4 años bajo condiciones históricas, mientras que en un futuro seco plausible (reducción de la precipitación del 35%) es de 7,4 años: -y alrededor de 2,1 años bajo un futuro húmedo plausible (aumento de la precipitación del 32%).

Fase IV - Gestión de riesgos

En la fase final del estudio DTF, se ha analizado y evaluado un conjunto de intervenciones para mejorar la resiliencia y robustez del sistema Chancay-Lambayeque a través de las incertidumbres (escenarios) climáticas y no climáticos: un proyecto de restauración y manejo sostenible de la Infraestructura Natural (IN), un aumento de la explotación y uso de aguas subterráneas (AS), y la construcción de las presas de Sicán (SI) y La Montería (MO). También se han considerado diferentes portafolios de intervención, especificados como SI-MO, SI-AS, MO-AS, SI-MO-AS, respectivamente. Cada opción se ha evaluado bajo una amplia gama de cambios climáticos y bajo los niveles de demanda de riego actuales y los proyectados para el horizonte 2035.

- **El uso de aguas subterráneas (AS) es la opción más costo-efectiva para satisfacer la demanda de agua.** La rentabilidad incremental para AS (coste requerido para aumentar la confiabilidad del riego en un 1%) se estima en 5,5 millones de dólares. AS fue seguido por MO-AS (\$27M), y SI-AS (\$30M). SI (\$268M) y SI-MO (\$129M) resultaron ser las opciones menos rentables.
- **Entre las dos presas consideradas, MO es ligeramente más efectiva que SI en términos de satisfacción de la demanda de agua poblacional.** La confiabilidad promedio aumentó desde el 53%, hasta el 53,5% y 55% para SI y la MO, respectivamente. Sin embargo, estos resultados muestran que los beneficios en términos de mejora de los indicadores de desempeño fueron relativamente pequeños en ambos casos.
- **Los portafolios MO-AS y SI-MO-AS mostraron los mejores ratios costo-efectividad para satisfacer la demanda de agua de riego.** La confiabilidad promedio aumentó del 53%, hasta el 60% y el 61% para MO-AS y SI-MO-AS, respectivamente (por debajo de los niveles de desarrollo de riego de 2035).
- **Ninguna de las intervenciones evaluadas proporciona una elevada robustez para satisfacer la demanda de agua de riego.** Considerando el desarrollo agrícola proyectado para el horizonte 2035, se concluye que el umbral-objetivo de confiabilidad del 80% es demasiado alto para el sector agrícola. Para aumentar la robustez, se necesitan la adopción de medidas operativas, como la mejora de la eficiencia en el uso del agua, la reducción de las pérdidas, y/o la selección de cultivos mejor adaptados a la escasez.
- **La infraestructura natural (IN) proporciona beneficios modestos para la reducción de las inundaciones.** Encontramos que la IN puede reducir ligeramente los caudales máximos diarios observados en Racarumi dependiendo del escenario climático (hasta un 5-10%). Sin embargo, los cambios generales en las curvas de frecuencia de caudal diario son insignificantes.
- **Un análisis limitado y semicuantitativo muestra que SI o MO no pueden reducir sustancialmente el riesgo de inundación en las zonas de valle.** La capacidad limitada de los canales de derivación de ambas presas (7 y 20 m³/s para SI y MO, respectivamente) reduce la efectividad de estas dos presas para laminar de caudales críticos y reducir el riesgo de inundación.

Lista de siglas y abreviaturas

AAA	Autoridad Administrativa del Agua
ALA	Administración Local del Agua
ANA	Autoridad Nacional del Agua
CMIP5	Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados (Fase 5)
CPM	Centros Poblados Menores
CRHC-CL	Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca – Chancay Lambayeque
DTF	Marco del Árbol de Decisión (<i>Decision Tree Framework</i>)
ENSO	El Niño–Oscilación del Sur
EPSEL	Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento de Lambayeque
GCM	Modelo General de Circulación (<i>Global Circulation Model</i>)
GEV	Distribución Generalizada de Valores Extremos (<i>Generalized Extreme Value distribution</i>)
GIRH	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
GOF	Bondad del ajuste (<i>Goodness of fit</i>)
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales
IOS	Índice de Oscilación Sur
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
JASS	Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento
LRH	Ley de Recursos Hídricos
MMC	Millones de metros cúbicos
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
PEA	Población Económicamente Activa (o Población Activa)
PEOT	Proyecto Especial Olmos Tinajones
PET	Población en Edad de Trabajar (o Población en edad laboral)
PGRH	Plan de Gestión de Recursos Hídricos
RCP	Trayectoria de Concentración Representativa (<i>Representative Concentration Pathway</i>)
RMSE	Raíz del Error Cuadrático Medio (<i>Root-Mean-Square Error</i>)
SASCC	Servicios de Agua y Saneamiento de Centros Comunales
SLP	presión a nivel del mar (sea level pressure)
SST	Temperatura Superficial del Mar (<i>Sea surface temperature</i>)
WARM	Modelo Autoregresiva de Ondículas (<i>Wavelet Autoregressive Model</i>)
WB	Banco Mundial (<i>World Bank</i>)
WEAP	Modelo WEAP para la evaluación y planificación de recursos hídricos (<i>Water Evaluating and Planning system</i>)

Glosario de términos

Análisis de arriba-abajo	Métodos de evaluación del riesgo climático que adoptan una aproximación descendente, esto es poniendo especial énfasis en los riesgos asociados a las proyecciones climáticas generadas por los modelos globales o regionales de cambio climático
Análisis de abajo-arriba	Métodos de evaluación del riesgo climático que adoptan una aproximación ascendente, esto es poniendo especial énfasis en la participación de los agentes locales y la identificación de las vulnerabilidades del sistema analizado frente al cambio climático.
Análisis de regresión	Clase general de métodos estadísticos que permite examinar la relación entre una variable dependiente ("predictor") y una o más variables independientes ("predictores"). El análisis de regresión es ampliamente utilizado en hidrología, especialmente para predicción y pronóstico.
Análisis de sensibilidad	Una técnica simple utilizada para determinar cómo los valores de variables independientes (entrada del modelo) afectarán los valores de una variable dependiente particular (salida del modelo) bajo un conjunto dado de supuestos. En algunas ocasiones se le denomina "Y si" análisis.
Caudal base	El flujo base es la porción del flujo superficial que se mantiene entre los eventos de precipitación, alimentada a las corrientes por vías retrasadas.
Cambio climático (<i>Anthropogenic Climate Change</i>)	Fenómeno global que hace referencia a los cambios causados por la actividad antrópica que afectan la temperatura global, precipitación, patrones de viento y otras variables del clima en un horizonte decadal o superior.
Coefficiente de correlación de Pearson	También conocida como la r de Pearson, se usa comúnmente en las ciencias para cuantificar la correlación lineal entre dos variables. La r de Pearson obtiene un valor entre +1 y -1, donde +1 es una correlación lineal positiva total, 0 no es una correlación lineal y -1 es una correlación lineal negativa total.
Distribución de valores extremos	Las distribuciones de valores extremos son las distribuciones limitantes para los valores mínimos o máximos (como la precipitación diaria máxima anual) de una colección muy grande de observaciones aleatorias de la misma distribución arbitraria. La más común es la distribución de tipo I, que a veces se conoce como tipos de Gumbel o simplemente distribuciones de Gumbel.
El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)	Una variación irregular periódica en los vientos y las temperaturas de la superficie del mar sobre el Océano Pacífico oriental tropical. Se sabe que ENSO afecta el clima de Perú, así como gran parte de los trópicos y subtropicales.
Elasticidad	Una medida del cambio proporcional de una variable de salida de un modelo (ej. la confiabilidad del suministro) en respuesta a un cambio en la variable de entrada (ej. escorrentía de la cuenca). Proporciona una forma estandarizada de comparar y clasificar múltiples variables en términos de su relevancia.

Escala de Decisiones	Un método de evaluación de riesgo climático de abajo hacia arriba desarrollado por Brown et. al (2011). La escala de decisiones se ejecuta en dos etapas: 1) identificar las condiciones futuras que podrían conducir a una situación de riesgo, y 2) examinar las probabilidades de ocurrencia del riesgo identificado en base en base a las proyecciones climáticas proporcionadas por un modelo.
Flexibilidad	Capacidad para responder dinámicamente a las condiciones cambiantes a lo largo del tiempo. La flexibilidad a veces se denomina adaptabilidad o robustez dinámica.
Generador de clima	Modelos matemáticos que producen series temporales sintéticas de datos meteorológicos a la longitud deseada para una ubicación geográfica como una cuenca fluvial. Se basan en las características estadísticas del clima observado en un lugar determinado. Se utilizan para diversos propósitos, como mejorar o ampliar los registros meteorológicos o la evaluación del impacto climático.
Marco del Árbol de Decisión	Un enfoque robusto de escala de decisiones del Banco Mundial que proporciona a los planificadores de proyectos y gerentes de programas con recursos limitados un método rentable y eficiente en términos de esfuerzo, científicamente defendible, repetible y claro para demostrar la solidez de un proyecto frente al cambio climático.
Matriz de correlación	Una tabla que muestra los coeficientes de correlación de Pearson entre conjuntos de variables. En una matriz de correlación, cada variable aleatoria en la tabla se correlaciona con cada una de las otras variables, lo que permite ver qué pares tienen la correlación más alta.
Método del Número de Curva del SCS	Método empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de EEUU (SCS) que se utiliza en hidrología para para estimar la escorrentía superficial asociada a un evento de lluvia. El número de curva es función del grupo hidrológico del suelo, de las condiciones hidrológicas para la infiltración, y del uso de la tierra y las prácticas agrícolas.
Modelos autoregresivos	Una clase específica de modelos de regresión en la que un valor de una serie de tiempo (como la precipitación) se regresa a valores anteriores de esa misma serie de tiempo. Los modelos autorregresivos son ampliamente utilizados en muchas disciplinas, incluidas la econometría y la hidroclimatología.
Modelos hidrológicos	Representaciones conceptuales simplificadas de una parte del ciclo hidrológico. Se utilizan principalmente para la simulación de procesos hidrológicos o variables como la evapotranspiración, la infiltración o la escorrentía superficial.
Modelos sistémicos de recursos hídricos (Water Resources System Models)	Modelos que se utilizan para informar las decisiones sobre el suministro de agua, la restauración ecológica y la gestión del agua en cuencas fluviales o sistemas regionales. Se usan comúnmente para evaluar una variedad de medidas relacionadas con la infraestructura, la operación y la gestión de la demanda en términos de cantidad y calidad del agua.

Periodo de retorno	Una estimación de la probabilidad de que ocurra un evento, como un deslizamiento de tierra o un flujo de descarga del río. El período de retorno también se conoce como un intervalo de recurrencia y generalmente se deriva de datos históricos basados en el intervalo de recurrencia promedio durante un período prolongado período de tiempo (como 50-70 años).
Prueba de tendencia de Mann-Kendall	Una prueba estadística de uso común para analizar si los valores de una variable se incrementan o disminuyen de manera consistente y monotónicamente a lo largo un periodo de tiempo. Mann-Kendall es una prueba no paramétrica, lo que significa que funciona para todas las distribuciones, sin embargo, los datos ahora deben mostrar correlación en serie.
<i>Regret</i>	La diferencia entre el desempeño de alguna estrategia en un futuro particular y el desempeño de la mejor estrategia en ese futuro.
Rentabilidad incremental	Una estadística utilizada para resumir la rentabilidad de una inversión. En el contexto de este estudio, se define como el costo asociado a un aumento unitario en el indicador de desempeño (ej. coste asociado que supondría aumentar en un 1% la confiabilidad del suministro de agua).
Resiliencia	Capacidad para recuperarse de un evento considerado inaceptable o situación fallida.
Robustez	Capacidad para desempeñarse de manera aceptable en una amplia gama de posibles condiciones futuras.
Transformada de ondícula	Una técnica matemática utilizada en el proceso de generación del clima. Se utiliza para descomponer una serie temporal de una variable meteorológica en múltiples componentes de baja frecuencia mediante el control de los factores de escala y desplazamiento de una sola función de ondícula (wavelet).
Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs)	Trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero adoptadas por el quinto informe de evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Los PCR proporcionan escenarios globales para una gama de posibles cambios en las condiciones de desarrollo socioeconómico futuro.
Variabilidad climática de baja frecuencia	Oscilaciones persistentes en los regímenes climáticos globales, regionales o locales que dan como resultado una variabilidad climática en escalas interanuales (3-5 años) a múltiples décadas (10-70 años). Estas variaciones son causadas por fenómenos atmosféricos como la Oscilación del Pacífico Norte (NPO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) o la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO).
Variabilidad climática natural	Describe la forma en que las variables climáticas, como la temperatura y las precipitaciones, se apartan del valor promedio en determinados meses, estaciones, años, décadas o siglos. La variabilidad climática puede ser el resultado de procesos naturales dentro del sistema climático e incluye fenómenos como El Niño / La Niña.

Tabla de Contenidos

Resumen ejecutivo	a
Lista de siglas y abreviaturas	e
Glosario de términos	f
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo y enfoque del estudio	2
1.3 Organización del informe	3
2 Metodología: El Marco del Árbol de Decisión	5
2.1 Marco General	5
2.2 Las cuatro fases del Marco del Árbol de Decisión	9
2.2.1 Fase I: Exploración del Proyecto	9
2.2.2 Fase II: Análisis Inicial	10
2.2.3 Fase III: Prueba de Estrés Climático	10
2.2.4 Fase IV: Gestión del Riesgo Climático	11
2.3 Metodología aplicada a la cuenca de Chancay-Lambayeque	12
3 Área de Estudio: Cuenca de Chancay–Lambayeque	15
3.1 Descripción general del sistema	15
3.1.1 Características geográficas	15
3.1.2 Hidroclimatología	16
3.1.3 Demanda de agua	18
3.1.4 Condiciones socioeconómicas	25
3.1.5 Infraestructura actual, demanda y regulaciones de flujo	26
3.2 Plan de Gestión de Recursos Hídricos - 2015	27
3.3 Plan de Infraestructuras Hidráulicas - 2012	28
4 Fase I: Exploración del Proyecto	31
4.1 Consultas con partes interesadas	31
4.1.1 Consecuencias (indicadores de desempeño)	33
4.1.2 Incertidumbres	34
4.1.3 Opciones (intervenciones)	35
4.1.4 Conexiones (modelos)	40
4.2 Síntesis	43
5 Análisis de datos hidroclimáticos	45
5.1 Análisis de los datos climatológicos históricos	45
5.1.1 Descripción de los datos disponibles	45
5.1.2 Correlaciones espaciales en los datos climáticos	48
5.1.3 Análisis de la tendencia de las variables climáticas	51
5.1.4 Variaciones estacionales en las variables climáticas	56
5.1.5 Variabilidad climática interanual	57
5.1.6 Variabilidad de baja frecuencia de precipitación anual	63
5.2 Proyecciones del modelo climático	67

5.3	Análisis de caudales extremos	70
5.4	Síntesis	73
6	Fase II: Análisis Inicial	75
6.1	Análisis inicial del riesgo de suministro de agua	75
6.1.1	Análisis de sensibilidad de factores de incertidumbre	76
6.1.2	Elasticidades de la confiabilidad de satisfacción de la demanda	83
6.1.3	Rangos de rendimiento plausibles para los indicadores de desempeño	84
6.2	Análisis de sensibilidad de las reglas de asignación	86
6.3	Análisis inicial del riesgo de inundación	87
6.3.1	Análisis de valores extremos de caudal en la estación Racarumi	88
6.3.2	Modelo de regresión precipitación-caudal máximo	90
6.3.3	Análisis de niveles críticos de flujo bajo cambio climático	91
6.4	Síntesis	93
7	Fase III: Prueba de Estrés Climático	95
7.1	Resumen del proceso e implementación	95
7.2	Resultados	99
7.2.1	Impacto del clima en los caudales	99
7.2.2	Suministro poblacional y de riego.	100
7.2.3	Riesgo de inundación	106
7.1.1	Análisis de robustez y resiliencia	107
7.3	Síntesis	109
8	Fase IV: Gestión del Riesgo Climático	113
8.1	Visión general	113
8.2	Indicadores de desempeño para las opciones de intervención	114
8.2.1	Infraestructura Natural (IN)	114
8.2.2	Incremento del uso de agua subterránea (AS)	116
8.2.3	Presa Sican (SI)	118
8.2.4	Presa La Montería (MO)	119
8.3	Impacto de Sican y La Montería sobre el riesgo de inundaciones	120
8.4	Comparación del desempeño de las opciones de intervención y portafolios	121
8.5	Rentabilidad de los portafolios de intervención	127
8.6	Síntesis	129
9	Conclusiones	131
10	Recomendaciones	133
11	Bibliografía	137
ANEXOS		142

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La cuenca Chancay – Lambayeque, ubicada en la costa del Pacífico del Perú, se enfrenta a una serie de desafíos interrelacionados con la gestión del agua entre los que se incluyen la falta de garantías en el suministro de agua, los riesgos de inundaciones, y el deterioro de la calidad del agua. Estos desafíos o riesgos pueden acrecentarse en el futuro debido al aumento de la demanda de agua ligada al crecimiento de la población y la expansión agrícola, el deterioro de las infraestructuras hidráulicas, y la reducción de la disponibilidad de agua debido a los efectos del cambio climático. Este estudio aplica el Marco del Árbol de Decisión (DTF, por sus siglas en inglés *-Decision Tree Framework-*) desarrollado por el Banco Mundial en la cuenca Chancay – Lambayeque, para cubrir dos objetivos específicos:

- Analizar la respuesta del sistema frente a los riesgos impuestos por factores climáticos y no climáticos
- Proveer un marco metodológico consistente y científicamente reproducible que oriente sobre la efectividad de diferentes intervenciones y estrategias de adaptación en los escenarios de cambio de clima y de demanda proyectados en la cuenca para el medio-largo plazo.

Este estudio representa la primera aplicación práctica a nivel mundial de la aproximación DTF a un Plan de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) elaborado a escala de cuenca.

Perú, con aproximadamente una disponibilidad de 77,600 metros cúbicos de agua dulce por persona, es uno de los países con más abundancia de agua en América Latina. Sin embargo, los recursos hídricos en el Perú no están distribuidos equitativamente a lo largo de las tres áreas hidrológicas principales. Por ejemplo, en la vertiente del Atlántico se concentra aproximadamente el 97% del agua disponible, pero solo el 34% de la población vive en dicha zona. En contraste, en la vertiente del Pacífico solo se dispone del 2% del agua de suministro para una población que representa el 62% del total del país. Un segundo desafío de la gestión del agua en el Perú son las inundaciones periódicas asociadas al fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur (ENSO). Los eventos más recientes de El Niño a finales de 2016 y principios de 2017 se registraron como unos de los más destructivos en la serie histórica, habiendo afectado a más de 1.5 millones de personas (Venkateswaran et al., 2017; French et al., 2017). Finalmente, un tercer desafío es la degradación de la calidad del agua en ríos y acuíferos, debido especialmente a las actividades mineras y agrícolas (Bebbington y Williams, 2008).

Para abordar los desafíos de gestión del agua en el Perú, se ha propuesto un enfoque de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) durante los últimos años. En 2004, el gobierno peruano definió la “Estrategia Nacional para la Gestión de los Recursos Hídricos Continentales del Perú”, que reúne a agentes gubernamentales locales, regionales y nacionales para la formulación e implementación de un enfoque integrado y participativo en la gestión del agua. En el marco de esta estrategia, se constituyó la Autoridad Nacional del Agua (ANA) dependiente del Ministerio de Agricultura en 2008, y posteriormente se aprobaron la Ley de Recursos Hídricos en 2009 y el Reglamento que la desarrolla en 2010. Para la implementación de la GIRH, la ANA ha establecido dos organismos principales: las Autoridades Administrativas del Agua (AAA) y las Autoridades Locales del Agua (ALA). Ambos organismos asumen de manera coordinada la responsabilidad en la gestión de las 159 cuencas en Perú (Oliva, 2016).

A inicios del 2010, el gobierno del Perú adoptó e implementó los principios de la GIRH a nivel nacional, y, a escala piloto, en seis cuencas seleccionadas en la vertiente del Pacífico (WB, 2017). En 2015, el plan de GIRH para la cuenca de Chancay-Lambayeque fue publicado por la ANA tras un proceso participativo. El plan de GIRH para Chancay-Lambayeque es válido por 15 años con un ciclo de evaluación de 5 años. En él se definen los objetivos específicos de gestión para la cuenca y se establecen los indicadores clave para el monitoreo y evaluación del plan, y un mecanismo institucional para su implementación.

También en el año 2015, *ProInversión* recepcionó el proyecto “Sistema Hidráulico Integral del Valle Chancay-Lambayeque”. El proyecto involucra diferentes inversiones en infraestructuras para apoyar al plan de GIRH, incluyendo la construcción de las presas La Montería y Sicán, el mantenimiento y la rehabilitación de la presa Tinajones, y la extensión del área agrícola en la cuenca. Asimismo, es conocido que en el transcurso de los años 2019 y 2020 se realizará un Plan Integral para el Control de Inundaciones y Movimientos de Masa para la cuenca Chancay-Lambayeque, el cual se enmarca en el Plan de Desarrollo Hidráulico Regional y será conducido por el Gobierno Regional de Lambayeque a través del Proyecto Especial Olmos Tinajones (PEOT).

Si bien las intervenciones y políticas propuestas en el plan de GIRH y en *ProInversión* son un avance en la mejora del manejo del recurso hídrico de la cuenca, es probable que el rendimiento de estas intervenciones sea sensible a las futuras condiciones climáticas y demográficas. Las más recientes evaluaciones del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sugieren que el Perú puede ser uno de los países más vulnerables al cambio climático, habiéndose proyectado severas retracciones de la superficie y volumen de los glaciares, una mayor variabilidad en los patrones de precipitación y un incremento en la recurrencia e intensidad de eventos hidroclimáticos extremos (inundaciones y sequías). La creciente demanda de agua debido al crecimiento poblacional puede exacerbar la desigual distribución y demanda de agua, mientras que las incertidumbres financieras pueden dar lugar a retrasos en la finalización de los nuevos proyectos.

1.2 Objetivo y enfoque del estudio

Para evaluar la resiliencia de la cuenca a futuras incertidumbres y priorizar las diferentes intervenciones, aplicamos el DTF desarrollado por Banco Mundial al sistema Chancay-Lambayeque. El objetivo general de la consultoría es evaluar el rendimiento del sistema hidráulico de la Cuenca Chancay-Lambayeque a los cambios -climáticos y no climáticos- actuales o potenciales en las condiciones de línea de base; e identificar las estrategias de adaptación utilizando el DTF como metodología para evaluar y manejar los riesgos compatibles con la sensibilidad potencial del sistema al clima y otros riesgos, con el fin de contribuir a la priorización de las inversiones.

El enfoque del trabajo incluye un análisis jerárquico de sensibilidad del sistema a las incertidumbres climáticas y no climáticas. De esta manera se busca evaluar el grado de robustez del sistema Chancay-Lambayeque, tanto en las condiciones de línea de base (actual), así como en las condiciones de futuro proyectadas para la cuenca bajo un rango de portafolios de intervención (opciones de inversión en infraestructuras y de manejo sostenible del territorio) previamente definidos. Dada la incertidumbre asociada al cambio climático y a las proyecciones climáticas futuras y otros factores no climáticos (aumento poblacional y expansión agrícola), el análisis adopta un enfoque abajo-arriba (*bottom-up*) donde se pone especial énfasis a la evaluación de la vulnerabilidad del sistema frente al cambio climático y unos escenarios de intervención u opciones de inversión.

La adopción de esta aproximación abajo-arriba resulta novedosa en el ámbito de la planificación hidrológica, y se contrapone a la aproximación tradicional arriba-abajo (*top-down*) que presta especial atención al análisis del riesgo a partir de las proyecciones climáticas impuestas por los modelos globales y regionales de cambio climático.

El proceso de DTF comienza con una primera fase de evaluación del alcance del proyecto (*Exploración del Proyecto*), en la que se definen los indicadores de desempeño a considerar, y se priorizan las principales opciones de intervención e inversiones a realizar de acuerdo con las partes interesadas consultadas. En una segunda fase, el *Análisis inicial*, se identifican las incertidumbres más importantes para la cuenca utilizando un análisis simple de sensibilidad y de respuesta del sistema sobre la configuración del sistema de referencia. Las dos últimas fases (*Test de estrés* y *Análisis de Gestión de Riesgos*) se aplicarían en el caso de que se demostrasen riesgos importantes en el análisis inicial sólo se aplicarían si se identifican riesgos importantes en la fase II, y si es necesario intervenir en el sistema existente para gestionar esos riesgos, respectivamente.

1.3 Organización del informe

Este informe está estructurado en 12 capítulos. *El Capítulo 1* brinda una introducción al estudio de la gestión de riesgos climáticos en la cuenca Chancay-Lambayeque. Asimismo, detalla la estructura y organización del presente informe. *El Capítulo 2* proporciona una breve descripción de la metodología general del DTF y un diagrama de flujo que ilustra la aplicación concreta de la metodología en la cuenca Chancay-Lambayeque. *El Capítulo 3* describe el área de estudio y las condiciones hidro-climáticas y socioeconómicas de la región, así como el Plan de Gestión de Recursos Hídricos y los diferentes planes hidráulicos aprobados para la vertiente. *El Capítulo 4* describe el alcance y resultados derivados de la Fase I (Exploración del Proyecto) tras el proceso de consulta y participación realizada con las partes interesadas; asimismo, se identificaron las consecuencias (indicadores de desempeño), incertidumbres, opciones (intervenciones) y conexiones (modelos). *El Capítulo 5* realiza un análisis detallado de la hidroclimatología de la región en base a los registros históricos y las proyecciones del cambio climático. *El Capítulo 6* describe el alcance y resultados de la Fase II (Análisis Inicial), donde se explora la magnitud de los impactos ocasionados por las incertidumbres climáticas y no climáticas a través de un análisis de evaluación rápida. *El Capítulo 7* describe el alcance y resultados de la Fase III (Prueba de Estrés Climático), identificándose las futuras vulnerabilidades y evaluando la magnitud de los riesgos del sistema Chancay Lambayeque con respecto a los factores de incertidumbre. *El Capítulo 8* describe el alcance y resultados de la Fase IV (Gestión del Riesgo Climático), donde se consideran intervenciones y a nivel de cuenca para mejorar la garantía en el suministro de agua para riego y uso poblacional, así como para reducir los riesgos de inundación en el valle. *Los Capítulos 9, 10 y 11* presentan las conclusiones, recomendaciones y bibliografía del presente estudio, respectivamente.

2 Metodología: El Marco del Árbol de Decisión

2.1 Marco General

El marco del árbol de decisión (DTF) es un proceso pragmático para evaluar los riesgos climáticos (y no climáticos) para los planes de recursos hídricos y los proyectos de desarrollo. El DTF está desarrollado con base en la necesidad de un proceso aceptado para la evaluación de riesgos del cambio climático en el Banco Mundial para incorporar las consideraciones climáticas y riesgos de desastre al contenido de los programas de desarrollo financiados por el Banco Mundial (Ray et al., 2015). El DTF aborda dos problemas clave: evaluación de riesgos y gestión de riesgos. Para el primer desafío de evaluación de riesgos, el DTF adopta técnicas basadas en la robustez tales como la prueba del estrés climático para definir escenarios de vulnerabilidad específica del proyecto relativos a los umbrales de rendimiento prescritos. Para el segundo desafío de gestión de riesgos, el DTF empareja el escalamiento de la decisión con herramientas avanzadas para la toma de decisiones bajo incertidumbre, tales como una toma de decisiones robusta (Groves y Lempert 2007) y las Senderos de Adaptación para buscar una adaptación robusta (Haasnoot et al. 2013; Kwakkel et al. 2015).

La estructura general del DTF se basa en el escalonamiento en la toma de decisiones, la aplicación de una metodología que incluye los mejores métodos actuales para la evaluación de los riesgos climáticos, y un análisis robusto para la toma de decisiones sustentado en procedimientos simples para la gestión de riesgos (Brown et al., 2011). El escalonamiento de decisiones se fundamenta en un análisis de vulnerabilidad estructurado que define en una primera fase las preocupaciones de las partes interesadas en relación a los escenarios climáticos futuros, dejando para fases posteriores el empleo de la información climática y la comunicación de las principales el nivel de preocupación para las vulnerabilidades climáticas identificadas. Es un enfoque basado en la robustez para la planificación del sistema de agua que hace uso de una prueba de estrés para la identificación de vulnerabilidades del sistema (Figura 2.1).

En general, el DTF proporciona una alternativa diferente a los métodos tradicionales “top-down”, (de arriba hacia abajo) enfocándose en la identificación de vulnerabilidades de un proyecto dadas por el cambio climático y otras incertidumbres (por ejemplo, financieras, sociales, etc.), más que en las predicciones del futuro climático, los cuales dependen de la elección de escenarios de emisión, el modelado climático subyacente y los enfoques localizados. El propósito de un análisis de DTF es identificar las alternativas de diseño o las opciones de planificación que son robustas, en otras palabras, que se desempeñan de manera aceptable o satisfactoria a lo largo de un amplio rango de posibles condiciones futuras. Las proyecciones del cambio climático son utilizadas después de este paso para proporcionar una visión de si las vulnerabilidades identificadas plantean riesgos significativos para el proyecto o no.

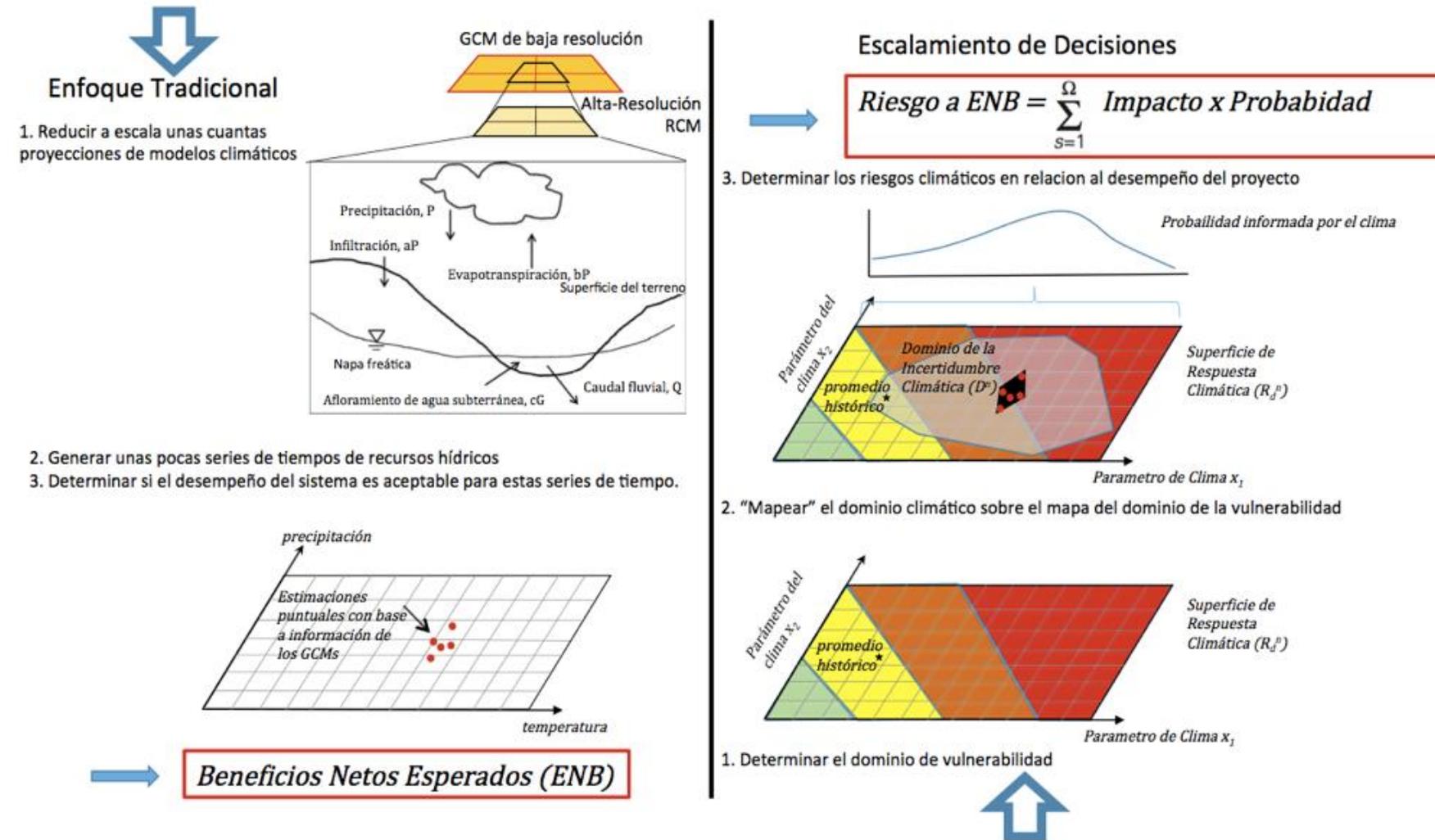


Figura 2.1 Comparación entre la aproximación tradicional "top-down" para la evaluación del riesgo del cambio climático (izquierda) y la metodología de Escalamiento de la Decisión (derecha) (Ray y Brown, 2015)

2.2 Las cuatro fases del Marco del Árbol de Decisión

El DTF consiste en un proceso jerárquico de cuatro fases, donde cada fase (salvo la primera) es accionada sólo si se demuestra, durante las exploraciones de la fase anterior, la necesidad del análisis de la siguiente fase (Figura 2.2). Estas cuatro fases (Exploración del Proyecto, , Análisis Inicial, Prueba de Estrés Climático, y Gestión del Riesgo Climático) se describen brevemente a continuación. Para mayores detalles sobre la metodología de DTF, los lectores pueden consultar a Ray y Brown (2015).

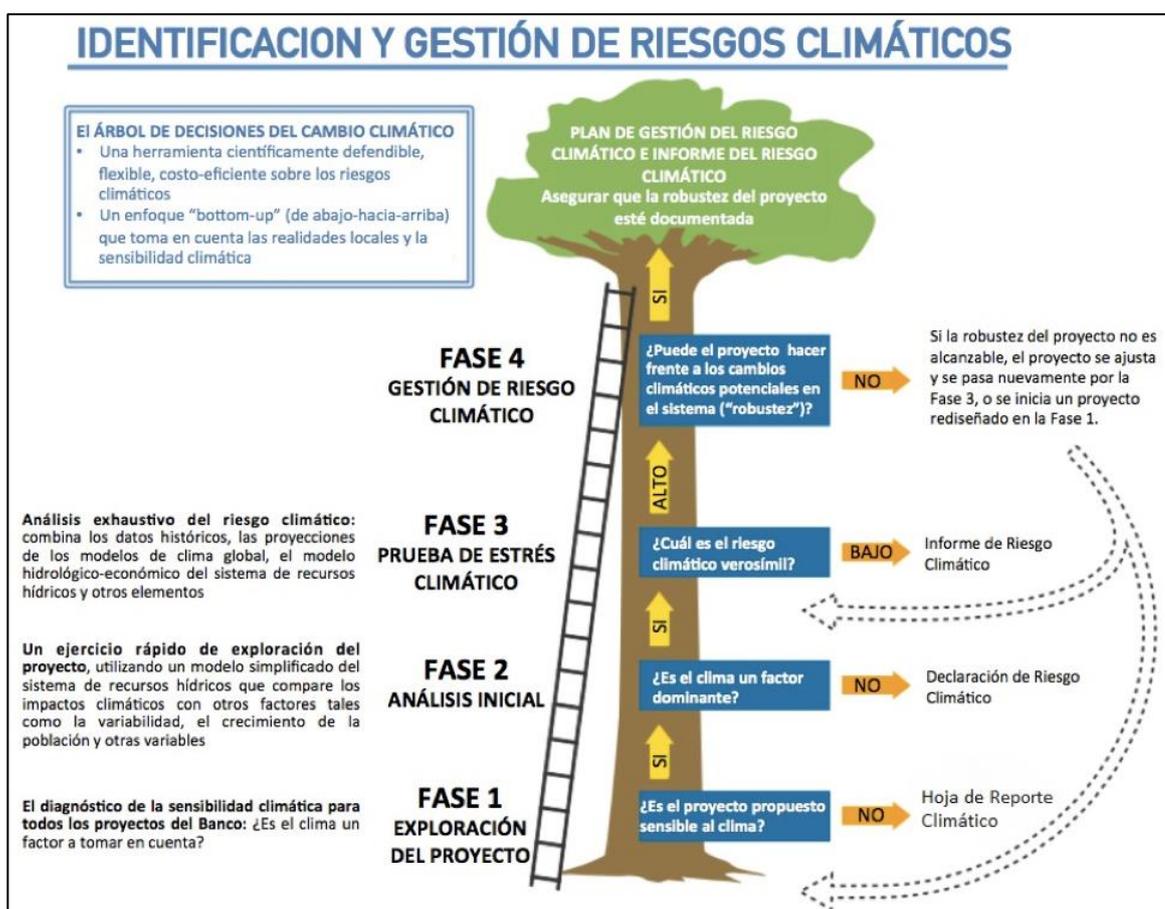


Figura 2.2. Estructura y fases del Marco del Árbol de Decisión.

2.2.1 Fase I: Exploración del Proyecto

La aplicación del DTF empieza con el análisis preliminar del sistema bajo estudio con el objetivo de identificar y definir de manera precisa los elementos más relevantes que controlan el funcionamiento del sistema y ayudan a la toma de decisiones. El objetivo de esta primera fase es constituir, con el apoyo de los agentes locales, un diagnóstico rápido de cómo funciona el sistema y evaluar la sensibilidad de un proyecto concreto o plan de actuación frente a factores climáticos y no climáticos.

Algunas preguntas de interés que pueden hacerse para comprender y evaluar la sensibilidad de los proyectos hacia el cambio climático incluyen:

- ¿De qué tipo de proyecto se trata? Los proyectos pueden ser:
 - de infraestructuras
 - de ajuste de la política del agua o gestión de la demanda
 - de capacitación de personal técnico
 - de evaluación ambiental o de recursos hídricos.
- ¿Cuáles son los umbrales para los indicadores de desempeño definidos por las partes interesadas?
- Si se trata de un proyecto de infraestructura, ¿Cuál es el tiempo de vida económica propuesto para la inversión?
- ¿Qué tipo de datos se utilizan para el diseño del proyecto? (datos históricos de caudal, datos climáticos...)

2.2.2 Fase II: Análisis Inicial

El propósito de la Fase II es identificar aquellos casos en los que el sistema puede ser especialmente sensible a cambios en el clima y no a otros factores de distinta naturaleza. El análisis inicial del proyecto puede realizarse mediante la aplicación de: 1) un análisis de sensibilidad simple, o 2) un enfoque de evaluación rápida del proyecto basada en el uso de modelos ya existente o la obtención de relaciones estadísticas simples a partir de los datos y observaciones históricas.

El análisis de sensibilidad intenta determinar cómo variaciones moderadas en los datos de entrada al modelo (factor) afectan a los resultados finales o variables dependientes. La aproximación más simple para evaluar la sensibilidad de un modelo consiste en evaluar los resultados derivados del modelo tras aplicar variaciones en los valores de un factor mientras se mantienen constantes el resto de los factores, por ejemplo, variando la temperatura media anual mientras el de variables se mantienen con los valores de base. La aplicación de un enfoque de evaluación rápida se basa en la evaluación simplificada del impacto potencial que tendría el clima futuro en la respuesta hidrológica del sistema mediante el uso de modelos o la búsqueda de relaciones empíricas entre factores. La adopción de un enfoque rápido permite tener una estimación de la sensibilidad relativa del proyecto a las proyecciones del modelo climático disponible, pero no proporciona un análisis de sensibilidad de detalle para el cambio climático.

La sensibilidad del proyecto al clima y otros factores de cambio e incertidumbre se puede expresar en términos de elasticidad de un indicador de desempeño. Por ejemplo, para un análisis de proyectos hidroeléctricos, la elasticidad de la producción hidroeléctrica a los cambios de temperatura y precipitación se pueden calcular y comparar entre sí. Al final de la Fase II, si los riesgos potenciales para el rendimiento del sistema se demuestran ser significativos para uno o más factores de incertidumbre, entonces se procede a un análisis de más detalle mediante la implementación de una Prueba de Estrés Climático (Fase III).

2.2.3 Fase III: Prueba de Estrés Climático

La Prueba de Estrés Climático sólo se ejecuta en el caso de que los resultados derivados de la segunda fase indiquen que los riesgos (elasticidad) asociados al cambio climático excedan a aquellos riesgos derivados de factores no climáticos. Si los modelos formales del sistema de recursos hídricos (tales como hidrología, calidad del agua, operaciones del sistema, etc.) no están disponibles, deben ser desarrollados para relacionar las condiciones climáticas con los impactos en los indicadores de desempeño identificados en la Fase I.

El primer paso de la Prueba de Estrés Climático es utilizar un generador de clima para la región de interés. El generador de clima permite la generación de series sintéticas de variables climáticas que conservan la variabilidad y las correlaciones temporales y espaciales de las series climáticas históricas. Las series sintéticas, o realizaciones climáticas, para una variable se pueden generar mediante la repetición del muestreo de datos históricos, o mediante la generación de series estocásticas a partir de los estadísticos fundamentales extraídos del registro histórico.

Una vez generado un número suficiente de realizaciones climáticas representativas del histórico (línea de base), los parámetros de estas realizaciones climáticas son alterados sistemáticamente para producir nuevas realizaciones bajo un amplio rango de cambios. Este procedimiento nos permite explorar los posibles efectos del cambio climático sobre la línea de base del histórico climático debido a cambios en la cantidad promedio, frecuencia, intensidad y duración de los eventos de precipitación, o a incrementos de la temperatura media.

Finalmente, los modelos hidrológicos y de evaluación-asignación de recursos hídricos son forzados para el periodo de estudio con las series temporales estocásticas generadas para todo el rango de climas futuros. A partir de los resultados de los modelos se calculan los indicadores de desempeño del sistema para todo el rango de variación climático evaluado, y se obtiene la Superficie de Respuesta Climática que es la representación gráfica de la variación del indicador de desempeño del sistema en función de los escenarios climáticos evaluados. Sobre la Superficie de Respuesta Climática también se puede colocar los valores de las variables climáticas derivadas de los modelos de generales/regionales de clima, y así evaluar la probabilidad del indicador de desempeño frente a los cambios climáticos subyacentes. Los resultados de la Fase III revelan en qué condiciones climáticas el sistema responde de manera inadecuada o inaceptable, y por tanto si se requiere una Gestión del Riesgo Climático (Fase IV).

2.2.4 Fase IV: Gestión del Riesgo Climático

La Gestión del Riesgo Climático corresponde a la última de las fases del análisis y se ejecuta solo en el caso de que se hayan identificado riesgos significativos en la fase anterior (Prueba de Estrés Climático). Esta fase guía a los gestores del proyecto sobre la selección de las herramientas disponibles para poder afrontar los riesgos climáticos identificados anteriormente. Los datos de entrada deben referirse a un proyecto que se ha demostrado tener vulnerabilidades preocupantes por los factores de cambio climático que razonablemente cabría esperarse que ocurran dentro del tiempo de vida del proyecto en estudio.

La pregunta relevante en la Fase IV es si la robustez o la resistencia del proyecto al rango plausible del cambio climático se pueden mejorar (por ejemplo, a través de proyectos de infraestructura, cambios en las reglas de operación y gestión del recurso hídrico). Las posibles mejoras en el desempeño del sistema se pueden evaluar realizando una prueba de estrés al sistema bajo las modificaciones propuestas. Para apoyar el proceso de análisis también se pueden incorporar diferentes de herramientas de gestión de riesgos al análisis de vulnerabilidad incluyendo la vía de políticas de dinámica adaptativa (Haasnoot et al. 2013) y/o de optimización de objetivos múltiples (Mulvey et al. 1995), entre otras.

2.3 Metodología aplicada a la cuenca de Chancay-Lambayeque

Hasta el momento, la metodología del DTF se ha aplicado en varias partes del mundo a diferentes tipos de proyectos de desarrollo de recursos hídricos, como el diseño de sistemas hidroeléctricos (Upper Arun, Nepal y Pako, Indonesia), el diseño de obras de abastecimiento de agua (proyecto Mwache, Kenia) y la planificación y desarrollo de aguas urbanas (Sistema de agua Cutzamala, México). La aplicación más reciente de la metodología ha sido para la evaluación de inversiones en riego y gestión de inundaciones en la cuenca de Nzoia (Kenia). Este proyecto en la cuenca de Chancay-Lambayeque difiere de las aplicaciones anteriores ya que considera un análisis a nivel de cuenca en lugar de un análisis a nivel de proyecto.

La aplicación de esta metodología a una escala de cuenca requiere adoptar un enfoque integrado para evaluar los riesgos y las oportunidades de los proyectos en cuestión, tomando en cuenta impactos directos e indirectos tanto en la parte baja como en la parte alta de la cuenca, mientras que un análisis a nivel de proyecto sólo se centraría en los impactos directos. Además, un análisis a nivel de cuenca considera múltiples proyectos y sus posibles combinaciones lo que hace que enfoques sofisticados, como una prueba de estrés climático, sean aún más desafiantes. Abordaremos estos desafíos poniendo un mayor énfasis en la fase II del análisis y considerando únicamente el conjunto más importante/pertinente de fuentes de incertidumbres climáticas y no climáticas para una evaluación adicional.

El diagrama de flujo propuesto para el estudio DTF Chancay-Lambayeque se muestra en la (Figura 2.3). El análisis comienza con la Fase de Exploración del Proyecto donde se revisa y define, en colaboración con los actores locales y partes interesadas, el contexto y las características clave del proyecto. Durante los dos talleres realizados en Chiclayo (parte baja de la cuenca), y Cajamarca (parte alta de la cuenca), se definieron las cuatro C's del análisis: las **opciones** (*Choices*), las **Consecuencias** (*Consequences*), las **Conexiones** (*Connections*), y las **incertidumbres** (*Uncertainties*). Las **opciones** hacen referencia a las inversiones proyectadas en la cuenca para mejorar las condiciones relacionadas con el déficit de abastecimiento de agua y el riesgo de inundación. Entre estas opciones se incluyen una serie de nuevas infraestructuras superficiales (embalses de Sican y La Montería), de infraestructura verde (proyectos de reforestación y desarrollo agroforestal), y de aumento de captación y explotación de aguas subterráneas. Las **Consecuencias** hacen referencia a los indicadores de desempeño para determinar la confiabilidad y vulnerabilidad del sistema para el suministro de agua doméstica y de riego, y para evaluar el período de retorno (recurrencia) de los niveles de alerta frente a inundaciones. Las **Conexiones** hacen referencia a las herramientas de modelización, hidrológica (HydroBID) y de asignación de recursos (WEAP), que permiten vincular las opciones y las consecuencias a través del modelo hidrológico. Finalmente, las **Incetidumbres** se definen como la lista de factores de estrés climático y no climático que se analizan en el marco del estudio. Estas incertidumbres son los cambios en la temperatura media y la precipitación a largo plazo, la distribución estacional de las precipitaciones, la acumulación de sedimentos en el embalse de Tinajones, los futuros niveles de demanda de agua doméstica y de riego, y finalmente la transferencia de agua desde los ríos Chotano y Conchano hacia la cuenca de Chancay-Lambayeque.

En la Fase II se realiza un ejercicio rápido de definición del alcance para identificar la magnitud de los impactos en el sistema de la cuenca en base a los tres indicadores de desempeño definidos. Para los indicadores de abastecimiento de agua doméstica y de riego, primero se realiza un análisis de sensibilidad para cada una de las siete incertidumbres climáticas y no climáticas evaluadas y se cuantifica las elasticidades para cada indicador.

Las incertidumbres climáticas evaluadas han incluido:

- Cambios en la temperatura media en relación con la media histórica (1970-2010)
- Cambios en la precipitación media en relación con la media histórica (1970-2010)
- Cambios en la ocurrencia de épocas lluviosas (enero-abril) en relación con el período histórico (1970-2010).

Las incertidumbres no climáticas han incluido:

- Cambios en la demanda de agua para abastecimiento poblacional en relación con el nivel histórico (1970-2010)
- Cambios en la demanda de agua para abastecimiento de riego en relación con el nivel histórico (1970-2010)
- Cambios en la tasa de acumulación de sedimentos para evaluar las reducciones en la capacidad de almacenamiento activo de la Presa Tinajones debido a la deposición de sedimentos
- Cambios en la transferencia de agua entre los ríos Chotano y Conchano y la cuenca Chancay-Lambayeque, en relación con el nivel histórico (1970-2010)

Tras la definición de los factores de incertidumbre evaluados, se estima el rango de desempeño plausible para cada factor en función de las elasticidades calculadas. Para el riesgo de inundación, se evalúa los intervalos de retorno para los niveles críticos de control de inundaciones para condiciones históricas y de escenarios futuros. Al final de la Fase II, se determinan las fuentes más importantes de incertidumbres climáticas y no climáticas que deben llevarse a cabo para el análisis de la Fase III.

En la Fase III, se cuantifica el desempeño del sistema de gestión Chancay-Lambayeque en una amplia gama de futuros con respecto al clima seleccionado y los factores no climáticos identificados. Los resultados de la Prueba de Estrés Climático se resumen a través de indicadores de *robustez* y *resiliencia* en el suministro de agua poblacional y para riego. En este estudio se define *robustez* como la capacidad (probabilidad) de un sistema para garantizar el suministro de agua en una amplia gama de condiciones. Un desempeño adecuado o satisfactorio en términos de garantía en el suministro viene definido por el establecimiento, por las partes interesadas, de umbrales u objetivos para cada uno los indicadores de desempeño analizados (ej. confiabilidad y vulnerabilidad) (Herman et al., 2015). Los objetivos de rendimiento utilizados para el cálculo de la robustez son 95% y 80% para la confiabilidad del suministro de agua doméstica y de riego, y 300 m³/s de caudal máximo diario en la estación Racarumi como nivel de alerta para el control de inundaciones. Se define *resiliencia* como "la capacidad de un sistema para sobrevivir, adaptarse y crecer frente al estrés y las conmociones" (Hashimoto et al., 1982). En este estudio se cuantifica la resiliencia en función de la rapidez con la que el sistema vuelve a un estado de desempeño aceptable cuando este ha caído por debajo del umbral.

Si la conclusión del análisis de la Fase III indica que el sistema no es robusto ni resiliente a los factores de incertidumbre climática y no climática, se procede con el análisis de la Fase IV (Gestión de Riesgos). En esta fase, se define un pequeño conjunto de posibles actuaciones y (aisladas o combinadas) basadas en el conjunto de opciones de inversión previamente definidas en la Fase I. Utilizando las mismas herramientas que en la fase III, se recalcula la robustez y la resiliencia del sistema para cada una de las actuaciones y portafolios de inversión y se evalúa en qué medida se logra una reducción de riesgo sobre el escenario de referencia.

Finalmente, se procede la recomendación final sobre las posibles opciones de actuación-inversión en base a un análisis coste-beneficio.

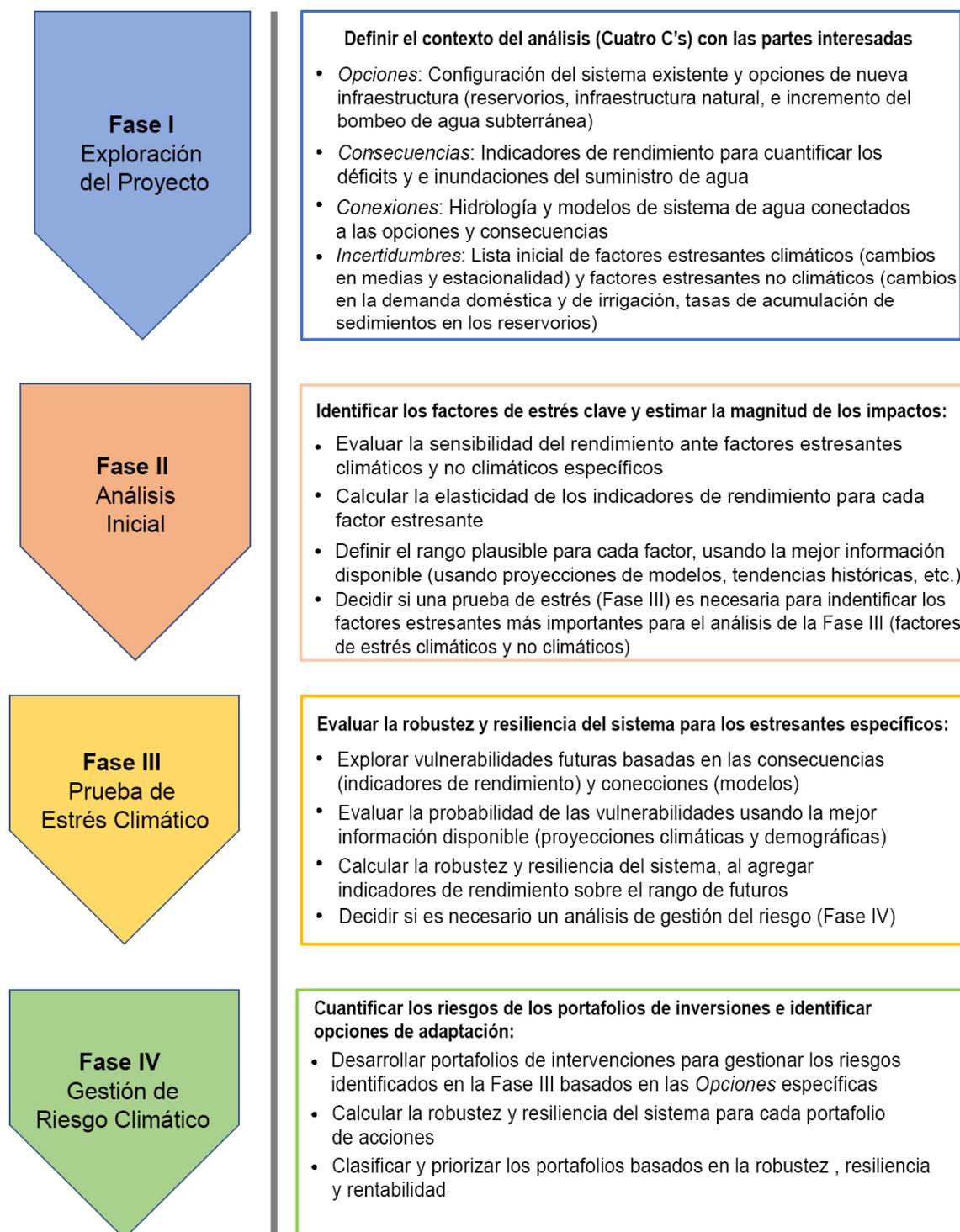


Figura 2.3 Diagrama de flujo con las fases del DTF y actividades implementadas en la cuenca de gestión hidrográfica de Chancay-Lambayeque

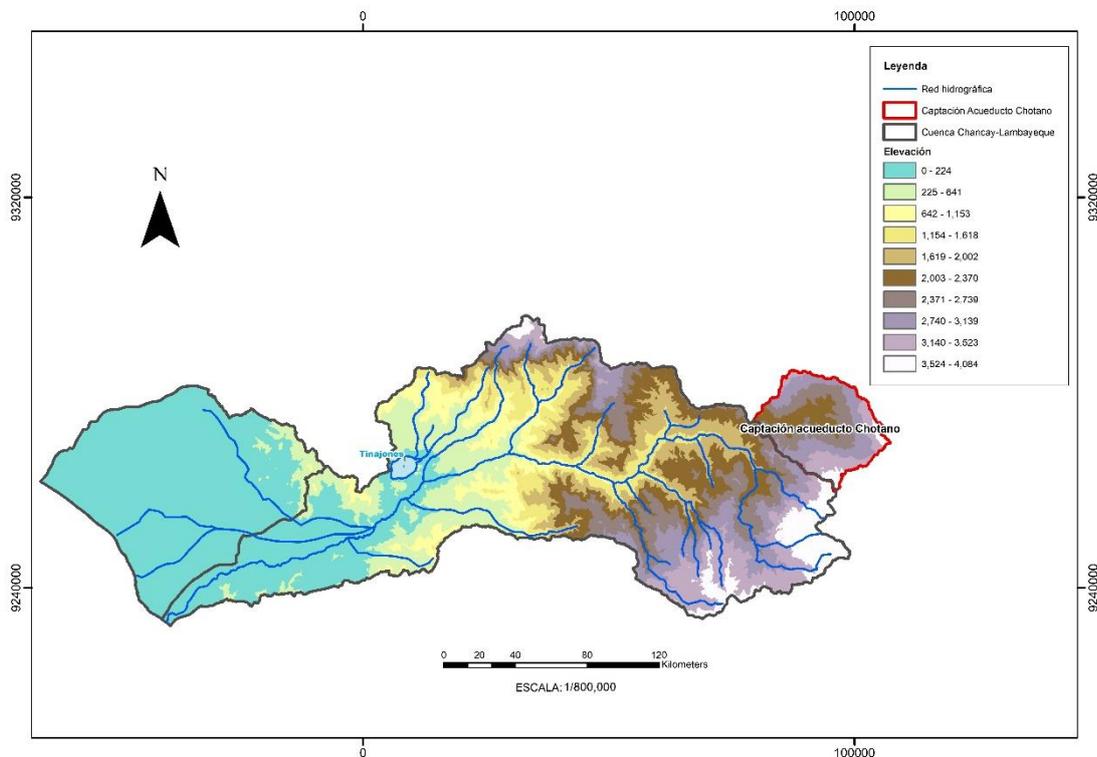


Figura 3.2 Mapa de Elevación de la Cuenca Chancay-Lambayeque

3.1.2 Hidroclimatología

El clima de la zona de riego del Sistema Tinajones es seco y subtropical, formado bajo los efectos de la corriente fría de Humboldt, motivo por el cual los valores de temperatura y precipitación son considerablemente más bajos que los que se esperarían en esta latitud geográfica: la temperatura media anual oscila entre los 23 °C en Tinajones, 21 °C en Lambayeque y 14,6 °C en Bambamarca (2.500 msnm) (Figura 3.3).

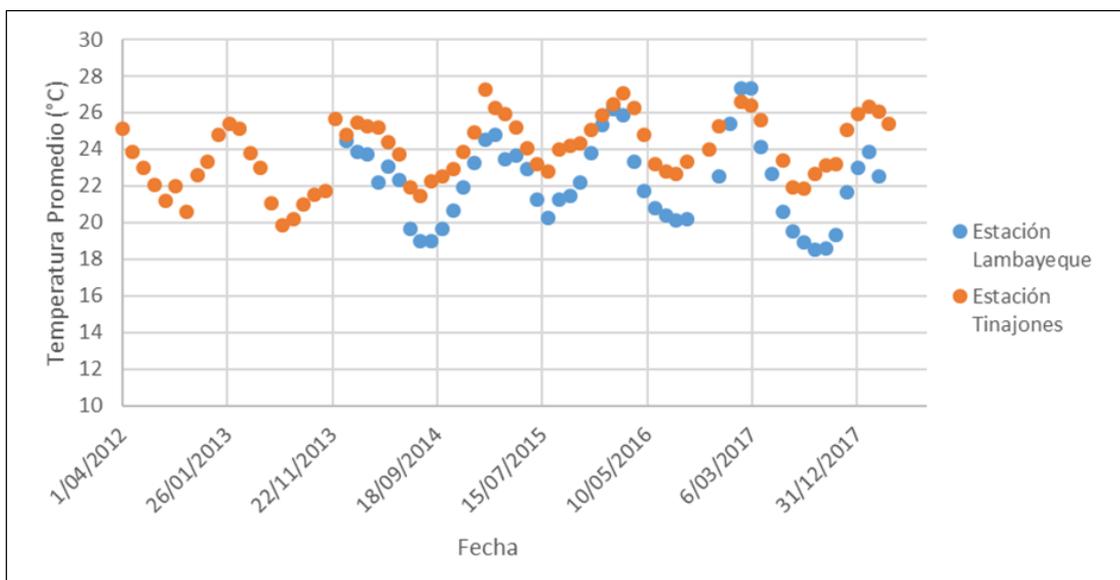


Figura 3.3 Registro de temperatura promedio de las estaciones Lambayeque y Tinajones

Los valores mínimos de precipitación media anual se registran en la franja costera (20.3 mm en Lambayeque), mientras que los máximos se observan en la zona alta de Chancay (1.678 mm en Santa Catalina de Pulán) (Figura 3.4). Las reducidas precipitaciones en la costa (Lambayeque, Tinajones) se concentran entre los meses de febrero y marzo. En las estaciones pluviométricas de la sierra, el primer máximo de la época de lluvias suele registrarse en los meses de octubre y noviembre y las precipitaciones intensas se producen entre febrero y marzo.

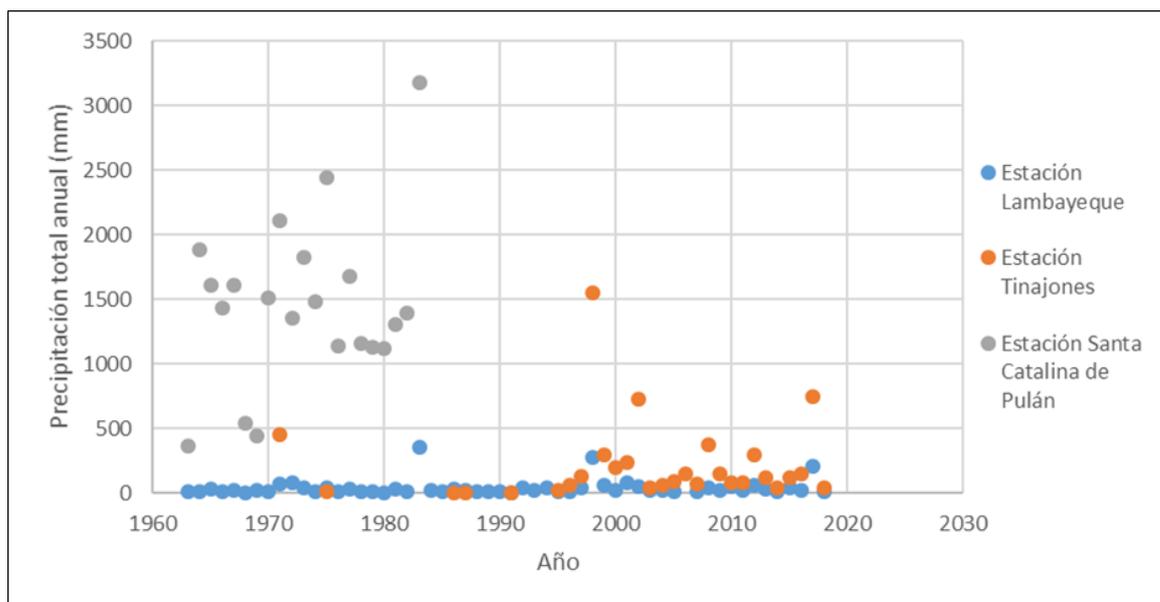


Figura 3.4 Registro de precipitación total anual de las estaciones Lambayeque, Tinajones y Santa Catalina de Pulán

Con respecto a la humedad relativa, Lambayeque tiene un promedio anual del 82% aproximado, siendo los meses de noviembre hasta abril los más secos, con el 78 a 80% de humedad relativa. El promedio anual más bajo de humedad relativa lo tiene Tinajones, con aproximadamente el 67%. En el valle de Chancay aumenta poco al principio (Santa Cruz, 68%) y alcanza en el valle de los ríos Chotano y Llaucano (Cochabamba y Bambamarca) valores entre el 70 y 80%. Con excepción de la zona costera hasta más allá de Tinajones, el mínimo de humedad relativa del aire se produce, en general, entre los meses de agosto y septiembre, con valores de entre 61 y 66%. El máximo, entre febrero y abril, con valores entre 75 y 85% (Figura 3.5).

Considerando la poca humedad relativa del aire, Tinajones tiene con 6.7 mm/día los mayores valores de evaporación; en la costa, debido a la alta humedad relativa del aire, solo se registra una evaporación diaria de aproximadamente 4 mm.

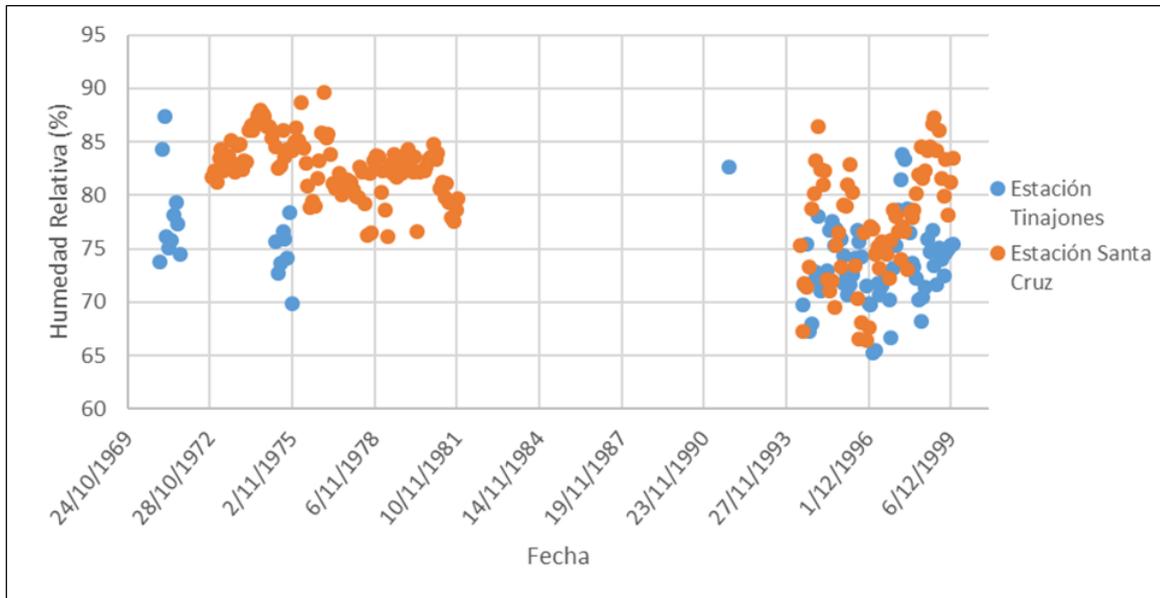


Figura 3.5 Registro de humedad relativa de las estaciones Tinajones y Santa Cruz

3.1.3 Demanda de agua

La demanda total de agua en la cuenca, incluyendo el sector no regulado (cabecera) de la cuenca y el sector regulado por el reservorio de Tinajones, asciende a 1.123 MMC/año, de los cuales el 91% correspondería a demanda de agua de riego, un 7% a demanda poblacional, y aproximadamente un 2% a la demanda de agua del sector industrial y minero (Cuadro 3.1). La demanda de agua para riego y abastecimiento poblacional esta mayoritariamente concentrada en el sector regulado (98% y 92%, respectivamente) mientras que el 100% de la demanda de agua necesaria para satisfacer las actividades mineras está en la zona de cabecera. Por sectores, la demanda de riego en el valle y sector medio de la cuenca (sistema regulado) representa el 80% de la demanda, seguido de la demanda de uso para suministro poblacional. En términos relativos, la preponderancia de la demanda agraria en el sector de cabecera se acentúa hasta el 93%, en comparación con el 5% que representa la demanda poblacional.

Cuadro 3.1 Valores de demanda de agua (MMC/año) por sectores de explotación en la Cuenca Chancay-Lambayeque recogidos en el modelo de asignación de recursos que acompaña al actual PGRH Chancay-Lambayeque (modelo WEAP-Plan)

Sector de demanda	Sistema no regulado (Sector Cabecera)	Sistema regulado (Sector Valle)	TOTAL	Sistema no regulado (%)	Sistema regulado (%)	Sector s. TOTAL (%)
Poblacional (POB)	4.39	52.38	56.77	7.7	92.3	5.1
Riego (IRR)	20.74	1005.10	1025.83	2.0	98.0	93.0
Industria (IND)	0.00	19.75	19.75	0.0	100.0	1.8
Minería (MIN)	0.93	0.00	0.93	100.0	0.0	0.1
TOTAL	26.07	1077.22	1103.28	2.4	97.6	100.0

Uso Poblacional

La demanda de agua para abastecimiento poblacional integra la demanda de todos aquellos usos que son servidos por la Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento de Lambayeque (EPSEL), las empresas municipales, las Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento (JASS), y los servicios de agua y saneamiento de centros poblados menores (CPM) y comunales (SASCC) menores de 2000 habitantes.

En el presente estudio se parte de una población de base de 710.940 hab. (población similar a la registrada en 1989) repartidos en seis Unidades Poblacionales (U.P.) tal cual se muestra en el Cuadro 3.2. Estos valores coinciden con los empleados en el modelo de asignación de recursos asociado al PGRH el cual ha sido empleado en este estudio como soporte a la aplicación de la Metodología del Árbol de Decisión.

La población de la cuenca por fue proyectada en un escenario futuro de 30 años de longitud, utilizando una tasa de crecimiento anual promedio y para toda la cuenca del 2.34%, hasta alcanzar un aumento de la población total del 68% respecto del año de base (Cuadro 3.2, Anexo 4). Esta tasa de cambio anual coincide con la proyectada en el PGRH para el periodo 2013-2035 (ver apéndice A5).

Cuadro 3.2 Población (Pob.) de base en la Cuenca de Chancay-Lambayeque y demanda de agua asociada (Dem.).

Unidad Poblacional (U.P.)	Sector de cuenca	Año Base		Año +30		Dem. per capita (l/día)
		Pob. (hab.)	Dem. (MCM/año)	Pob. (hab.)	Dem. (MCM/año)	
U.P. Cajamarca	Cabecera	78,695	4.39	132,207	7.38	152
U.P. Chongoyape	Valle	17,540	3.15	29,467	5.30	492
U.P. Chiclayo	Valle	524,768	40.18	881,610	67.50	210
U.P. Morrope	Valle	21,456	1.41	36,046	2.37	180
U.P. Mochumi	Valle	20,208	1.33	33,949	2.23	180
U.P. Lambayeque	Valle	48,273	6.31	81,098	10.60	358
TOTAL Cuenca Chancay-Lambayeque		710,940	56.77	1,194,377	95.40	219

Uso Agrario

Las demandas de uso de agua para riego están integradas por los usuarios de las diferentes comisiones y comités, representados por usuarios agrarios de la parte media y alta de la cuenca, y por los usuarios agrarios del valle, organizados en comisiones de usuarios y Junta de Usuarios. Las demandas se distribuyen en 8 sectores de riego repartidos entre el área de cabecera de la cuenca (sectores de Llama y Santa Cruz), y el sector medio de la cuenca y el valle (sectores de Chongoyape, Taymi, Cooperativas agroindustriales, Cachince, Lambayeque y Reque) (Figura 3.6). Casi la mitad de la superficie regada (48%) y de la demanda de agua para riego (49%) del total de la cuenca se concentra en los sectores de Taymi y de Cooperativas agroindustriales. Los valores de base de superficie regada y demandas de agua por sector y nodos de demanda quedan recogidos en el Cuadro 3.3.

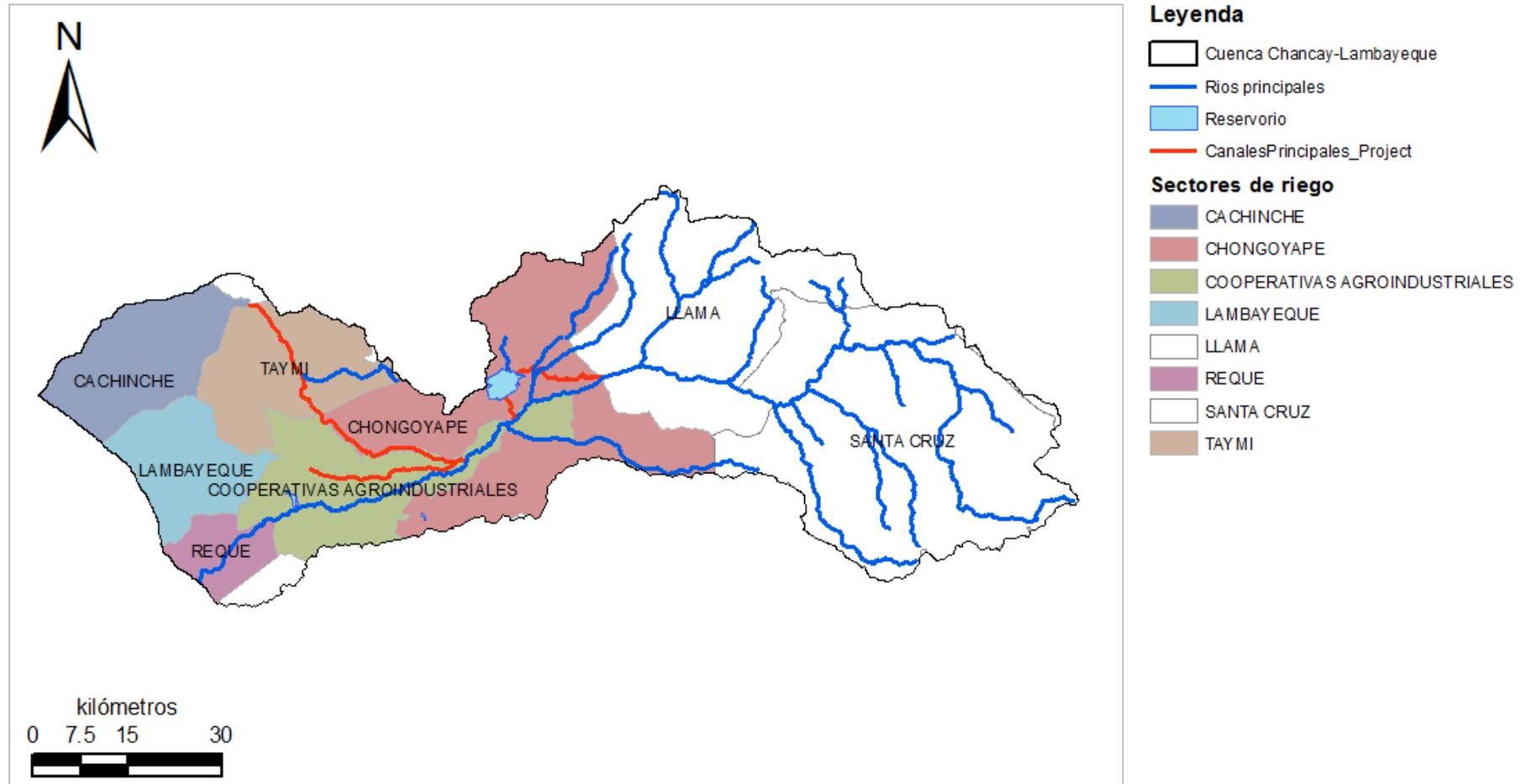


Figura 3.6 Ubicación de los sectores de riego en el sistema regulado por el reservorio de Tinajones.

Cuadro 3.3 Población de base en la Cuenca de Chancay-Lambayeque y demanda de agua asociada.

Sectores de riego y nodos de demanda	Superficie regada (ha)	Demanda de riego (MCM/año)
TOTAL Sistema no regulado (Cabecera de cuenca)	9,012	113.95 (10.01%)
Sector Santa Cruz	9,012 (8.69%)	113.95 (10.01%)
Santa Cruz	5,128	29.74
Subsector Catache	609	8.01
SubSector ChancayBaños	538	10.25
Subsector Chugur	254	1.24
SubSector Huambos	1,138	32.02
SubSector LaEsperanza	462	4.41
SubSector Nimabamba	79	2.16
SubSector San Miguel	805	26.12
TOTAL Sistema regulado de Tinajones (Sector medio y Valle)	94,713 (91.31%)	1024.27 (94.84%)
Chongoyape (Ch.)	6,095 (5.88%)	58.68 (5.16%)
Ch. Carniche	199	1.92
Ch. Chongoyape	306	2.95
Ch. Cuculi	113	1.09
Ch. El Palmo	257	2.47
Ch. Guayaquil	10	0.10
Ch. Homero	1,139	10.96
Ch. Huaca Blanca	340	3.27
Ch. Huanabal	28	0.27
Ch. La Ramada	178	1.71
Ch. Las Minas	189	1.82
Ch. Majin	1,045	10.06
Ch. Pampagrande	2,231	21.48
Ch. Santa Rosa	8	0.07
Ch. Terrazas	4	0.04
Ch. Vega Tabacal 1	39	0.38
Ch. Vega Tabacal 2	10	0.10
Cooperativas Agroindustriales (E.)	24,780 (23.89%)	258.28 (22.69%)
E. Calupe	9,905	103.24
E. La Puntilla	1,920	20.01
E. Patapo	2,880	30.01
E. Saltur	2,843	29.63
E. Saman	1,653	17.23

Sectores de riego y nodos de demanda	Superficie regada (ha)	Demanda de riego (MCM/año)
E. Sipan	2,382	24.83
E. Tabernas	3,198	33.33
Taymi (T.)	25,421 (24.51%)	302.59 (26.58%)
T. Balazo	108	1.29
T. Carrizo Chuchicol	750	8.95
T. Espino	162	1.93
T. Fala Falita	1,005	11.98
T. Huanabal	737	8.80
T. Luya Chucupe	4,212	50.24
T. Luzfaque	1,200	14.32
T. Pina	568	6.78
T. San Miguel	164	1.96
T. Sauce Talamo	139	1.66
T. Sencie	816	9.73
T. Tres Tomas	4,641	55.35
T. Tuman Jarrin	4,617	55.06
T. Informales1	3,000	35.78
T. Informales2	3,000	35.78
T. Informales3	300	2.99
Cachinche (C.)	19,460 (18.76%)	193.78 (17.03%)
C. Morrope	8,065	80.31
C. Sasape	2,325	23.15
C. Subsector Mochumi	2,247	22.38
C. Subsector Muy Finca	5,653	56.29
C. Tucume	1,171	11.66
Lambayeque (L.)	13,936 (13.44%)	162.35 (14.26%)
L. Santeno	3,026	35.25
L. Subsector Chiclayo	5,078	59.16
L. Subsector Lambayeque	5,657	65.91
L. Vista Alegre	175	2.03
Reque (R.)	5,021 (4.84%)	48.59 (4.27%)
R. Subsector Eten	308	2.98
R. Subsector Monsefu	3,900	37.74
R. Subsector Reque	813	7.87
TOTAL CUENCA	103,725	1138.22

3.1.4 Condiciones socioeconómicas

De acuerdo al Censo del 2007, la población total del valle es de 1,142,757 habitantes, siendo esta 5.7 veces mayor que la de 1940. Asimismo, según el censo, la población urbana para el 2007 fue de 885,234 habitantes mientras que la rural fue de 227,634 habitantes. Se observa que la población urbana y rural del valle (departamento de Lambayeque) se incrementaron en proporciones diferentes entre 1993 y 2007, probablemente debido a la migración del campo a la ciudad. La población urbana censada se incrementó en 24.7% mientras que en la rural aumentó 7,8% (INEI, 1993 y 2007).

Con respecto a la población económicamente activa (PEA), según los resultados del censo 2007, la PEA igual y superior a 14 años en el departamento de Lambayeque asciende a 396.996 personas, esto es, un 49,8% de la población en edad de trabajar (PET) correspondiente a la misma categoría de edad. Del total de la PEA registrada en el censo del 2007, el 67,8% (268 991) son hombres y el 32,2% (128 005) son mujeres. En el caso del departamento de Cajamarca, la PEA asciende a 454,141, representando 48,4% de la PET.

Al considerar a la población ocupada por sectores de actividad se observa que la actividad predominante es la agricultura en ambos casos, 20,3% en el departamento de Lambayeque y 55,8% en el departamento de Cajamarca; seguido por el comercio con un 20% en el departamento de Lambayeque y 8,1% en Cajamarca (INEI, 1993 y 2007).

En cuanto a los niveles de ingreso en la cuenca, el ingreso promedio mensual proveniente del trabajo para el 2012 en el departamento de Lambayeque ascendió S/. 843,5, y en el departamento de Cajamarca a S/. 797,8 (INEI, 2012). Estos valores se encontraron por debajo del ingreso promedio mensual nacional, el cual presentó un valor de S/. 1.141,1 (INEI, 2012).

Por otro lado, respecto a las tasas de pobreza, en 2016 el INEI estableció seis grupos de departamentos de niveles de pobreza teniendo en consideración que la precisión de los estimadores puntuales, no tuvieran diferencias significativas. El departamento de Cajamarca se encontró en el primer grupo, con una incidencia de pobreza que fluctúa entre 43,8% y 50,9%, mientras que el departamento de Lambayeque se ubicó en el cuarto grupo, con tasas de pobreza entre 14,0% y 18,1% (INEI, 2016)

Asimismo, en el caso del analfabetismo, se observa que en el departamento de Lambayeque existen 50,397 personas de edad igual o superior a 15 años que no saben leer ni escribir, lo que equivale al 6,5% de la población de este grupo de edad. En el departamento de Cajamarca la cifra en el mismo rango de edad es de 51,021 personas lo que representa el 17,1% de la población de este grupo de edad (INEI, 1993 y 2007).

Finalmente, con respecto a los servicios básicos, según la información analizada del INEI a diciembre del 2010, ajustada al ámbito de la cuenca del río Chancay-Lambayeque, 127,947 viviendas (47,7% del total de viviendas) cuentan con instalaciones domiciliarias o servicio de agua potable (INEI, 2016).

3.1.5 Infraestructura actual, demanda y regulaciones de flujo

La cuenca Chancay Lambayeque se encuentra dividida en dos zonas: (i) la parte alta y media, que no se encuentra regulada, y (ii) la parte baja que se encuentra regulada por el reservorio Tinajones, el cual requiere el desvío de las aguas del río Chancay Lambayeque, para luego devolverlas por el canal Taymi. A continuación, se describe la infraestructura hidráulica de la cuenca.

- **Reservorios**

Los dos principales reservorios de la cuenca Chancay-Lambayeque, Cirato y Tinajones, se encuentran ubicados en la parte media baja de la cuenca. El reservorio Cirato es una presa derivadora utilizada para elevar el tirante de agua para la producción de energía en la Central Hidroeléctrica Carhuaquero y tiene una capacidad de almacenamiento de 0,30 MMC; mientras que el reservorio Tinajones, de uso agrícola y de consumo, posee una capacidad de almacenamiento de 320 MMC. Además, se cuenta con el reservorio Boro (2 MMC), que almacena agua para uso poblacional, y Collique (4 MMC), para uso agrícola.

- **Obras de derivación**

Sistema trasvase Conchano-Chotano-Chancay

La cuenca de Chancay-Lambayeque recibe aportes de agua dos trasvases intercuenas (trasvase de Conchano y trasvase de Chotano). La interconexión con el río Chancay tiene lugar en las cercanías de Chirocongá en el distrito de Chancaybaños.

El trasvase de Conchano permite derivar un volumen de 90 MMC desde el río Conchano al río Chotano. La infraestructura, construida entre 1975 y 1982, consiste en un túnel revestido de concreto de sección circular de 2,5 m de diámetro y una longitud de 4213 m., y un conjunto de obras conexas. La capacidad máxima de trasvase es de 13 m³/s.

El trasvase de Chotano permite derivar un volumen de 200 MMC (incluyendo las aguas del trasvase Conchano) desde el río Chotano al río Chancay. La infraestructura, construida entre 1954 y 1960, presenta una sección de excavación tipo herradura con una longitud total de 5,322 m. y está compuesta por tres túneles: T1 de 397 m., T2 de 159 m., y el Túnel Principal de 4,766 m. La capacidad máxima de trasvase es de 30 m³/s.

Trasvase Carhuaquero

Recorre paralelo al río Chancay y lleva las aguas desde el reservorio de Cirato hasta la Central Hidroeléctrica de Carhuaquero. Tiene una longitud de 13,52 km y un diámetro que oscila entre los 3,3 y los 3,8 m.

- **Bocatomas y canales**

Bocatoma Racarrumi

La estructura permite la captación de las aguas del río Chancay de hasta 7 5 m³/s hacia el canal alimentador de Tinajones, habiendo soportado los eventos extraordinarios de los fenómenos El Niño de 1983 y 1998. Se encuentra en servicio desde el año 1969.

Repartidor la Puntilla

Deriva las aguas al río Taymi con una capacidad de 95 m³/s y el exceso al río Reque.

Bocatoma Monsefú-Reque

Capta las aguas del río Reque; 5 m³/s son aprovechadas por la Comisión de Regantes de Monsefú y 1,50 m³/s por la Comisión de Regantes de Reque.

Bocatoma Eten

Es la última bocatoma que capta las aguas del río Reque por su margen izquierda en 0.75 m³/s.

Canal alimentador del reservorio Tinajones

Se inicia en la bocatoma Raca Rumí, inmediatamente después de la estructura de salida del desarenador, y termina en la estructura de entrega al Reservorio Tinajones. Tiene una longitud de 16 080 km y una capacidad de 70 m³/s.

Canal de descarga del reservorio Tinajones

Se inicia inmediatamente después de la estructura de salida del túnel del Reservorio Tinajones y termina en la estructura de entrega al río Chancay. Tiene una longitud total de 3,60 km y una capacidad de 70 m³/s.

Canal Taymi

El canal Taymi recorre la zona de los sectores Ferreñafe y Mochumí en una longitud total de 48,8 km. Tiene una capacidad de 65 m³/s en su parte inicial (partidor Desaguadero) y de 25 m³/s en la parte final (partidor Cachinche). En su recorrido se han instalado 14 tomas laterales con estructuras de medición.

3.2 Plan de Gestión de Recursos Hídricos - 2015

El Plan de Gestión de Recursos Hídricos (PGRH) tal y como lo establece el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (LRH), es un instrumento de planificación del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos que indica la ruta que deben seguir los actores de una cuenca para alcanzar una gestión sostenible de los recursos hídricos y garantizar la atención de las demandas presentes y futuras de los usuarios en la cuenca.

Es una herramienta pública de gestión de recursos hídricos vinculante, es decir, de cumplimiento obligatorio en todo el país, y se encuentra articulada a la Política Nacional del Ambiente, a la Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos, al Plan Nacional de Recursos Hídricos y a los planes de desarrollo regional y local.

Su principal finalidad es la gestión concertada del medio ambiente, las actividades económicas y las aspiraciones de la sociedad poniendo en práctica el principio de gestión integrada participativa por cuenca hidrográfica. Esta modalidad de gestión considera de gran importancia la promoción de un uso del agua óptimo y equitativo, basado en su valor social, económico y ambiental, que tome en cuenta la participación organizada de los actores relevantes por cuenca hidrográfica.

Tal como lo dispone la LRH, el PGRH de la cuenca Chancay-Lambayeque ha sido elaborado gracias a un proceso participativo conducido por la Autoridad Nacional del Agua, representada por la Autoridad Administrativa del Agua Jequetepeque - Zarumilla y el Consejo de Recursos Hídricos de la Cuenca. A partir de una línea de base, se ha establecido una visión, escenarios, objetivos, programas y actuaciones que deben ejecutarse al corto, mediano y largo plazo con el fin de generar los cambios que se requieren para una adecuada gestión de los recursos hídricos.

Para la elaboración del Plan se ha considerado la cuenca hidrográfica como unidad de gestión, de uso multisectorial y con la premisa de un manejo integrado de los recursos hídricos. Se ha contado, asimismo, con la participación organizada de los actores de la cuenca (Estado, usuarios y sociedad civil), quienes han aportado sus conocimientos y sus deseos de mejora con el objetivo de conseguir una visión compartida de la gestión de los recursos hídricos en el ámbito del Consejo Chancay-Lambayeque en un futuro próximo. Los actores del agua en la cuenca son representados por los diversos organismos estatales, gobiernos regionales y locales, organizaciones de usuarios y sector privado.

3.3 Plan de Infraestructuras Hidráulicas - 2012

El Plan de Desarrollo Hidráulico de la Región Lambayeque, preparado por el Proyecto Especial Olmos Tinajones (PEOT), define un marco general para el desarrollo económico de las siete cuencas hidrográficas de la región de Lambayeque. Este plan tiene como objetivo abordar y controlar los riesgos de desastre por las inundaciones y las sequías en la región de Lambayeque, debido a la falta de medidas de previsión de las mismas. El plan abarca las siguientes cuencas (Figura 3.7):

- Cuenca Ñaupe — Cascajal.
- Cuenca Valle Olmos.
- Cuenca Valle Motupe.
- Cuenca Valle de Río Salas.
- Cuenca Valle Chancay — Lambayeque.
- Cuenca Valle La Leche.
- Cuenca Valle Zaña.

Con la finalidad de implementar este plan, se establecieron cuatro programas o líneas de actuación:

Gestión de Riesgos:

Programa 1 — Obras de regulación hídrica:

Este programa busca elaborar el planeamiento hidráulico de la infraestructura de regulación, definiendo el escenario más adecuado de operación, que permita dimensionar de manera óptima esta infraestructura, considerando la importancia de contar con estructuras de embalse en el eje del río para contener las avenidas de los ríos y sus afluentes principales.

Programa 2 — Obras de prevención:

Este programa tiene como objetivo apoyar el programa de las obras de ingeniería estructural y no-estructural para la protección de las riberas, que incluye el tratamiento de las principales causas de las inundaciones de los ríos de las siete cuencas de la Región de Lambayeque.

Desarrollo Económico:

Programa 3 — Desarrollo agrícola:

Este programa responde a la necesidad de contar con un instrumento orientador a partir del cual se deben encaminar todas las actividades con apoyo de todos los involucrados en el Sector con la finalidad de alcanzar los objetivos de desarrollo y la visión de futuro, dentro del marco de la política agraria nacional y las políticas sectoriales.

Programa 4 — Desarrollo hidroenergético:

Este programa busca evaluar la posibilidad de desarrollar pequeñas centrales hidroeléctricas en las siete cuencas que hacen parte del Plan de Desarrollo Hidráulico de la Región Lambayeque, con la construcción de las presas propuestas en el Programa 1. Estas centrales permitirían cubrir la demanda de energía de las cuencas para la tecnificación agrícola.

Asimismo, con el fin de impulsar el desarrollo económico integral y armónico de la región, se propone incluir en el tema del Desarrollo Económico acciones direccionadas a la Inclusión Social de la población involucrada, con enfoque en la sostenibilidad económica, social y ambiental.

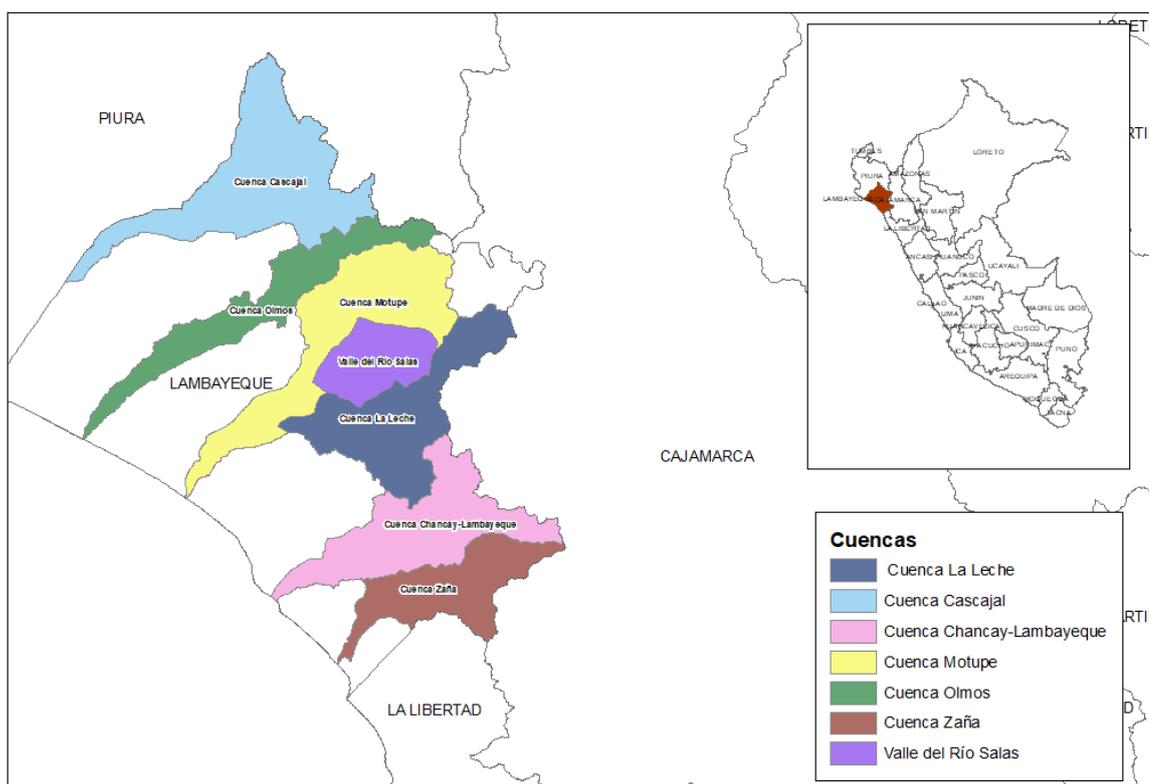


Figura 3.7 Cuencas estudiadas en el Plan Hidráulico

4 Fase I: Exploración del Proyecto

4.1 Consultas con partes interesadas

La Fase I de la aplicación del DTF a Chancay-Lambayeque se llevó a cabo mediante la consulta y la interacción con los actores relevantes de la cuenca. Las consultas se articularon a través de dos talleres de trabajo realizados en las ciudades de Chiclayo (parte baja de la cuenca) y Cajamarca (parte media-alta) en enero y febrero de 2019, respectivamente.

Los objetivos específicos en ambos talleres fueron los siguientes:

- Tomar conocimiento general de la situación actual (en gabinete y en campo) y del potencial de las diferentes intervenciones planificadas para la cuenca.
- Presentar la metodología general y las diferentes fases del DTF a los grupos de interés, y definir y programar el alcance del trabajo y las actividades necesarias para la aplicación en la cuenca Chancay-Lambayeque.
- Entablar una relación con el proyecto a cargo de Forest Trends - Condesan sobre infraestructura verde para una posterior evaluación de la inclusión de dichos resultados como una de las intervenciones a ser consideradas en el marco de este estudio.
- Comprender las inquietudes de las partes interesadas en relación con las incertidumbres climáticas y no climáticas que afectan a la cuenca.
- Conocer las propuestas de intervenciones e inversiones en la cuenca Chancay-Lambayeque en relación al manejo de los recursos hídricos para el corto y medio plazo.

En los apéndices A1 y A2 se presentan los programas de actividades de ambos talleres de trabajo realizados en Chiclayo del 28 al 31 de enero, y en Cajamarca el 25 de febrero del 2019, respectivamente.

Como principal resultado de las reuniones con las partes interesadas se definieron por acuerdo mayoritario cuáles son los principales desafíos actuales de la cuenca que debían priorizarse en el estudio, a saber:

- La garantía de abastecimiento de la demanda de agua poblacional, actual y proyectada en el medio-largo plazo, en las provincias de Chiclayo, Lambayeque, Chongoyape y Saltur-Sipán-San Martín.
- La garantía de abastecimiento de la demanda de agua de riego, actual y proyectada, en la cuenca de gestión hidrográfica de Chancay-Lambayeque.
- El riesgo de inundaciones en las áreas pobladas

Para cada uno de los desafíos identificados, se definieron los umbrales de confiabilidad y funciones objetivo que se consideran aceptables, estos son:

- Para el suministro de agua a la población, el sistema debe satisfacer al menos el 95% de la demanda total de la población.

- Para el suministro de agua para riego, el sistema debe satisfacer al menos el 80% de la demanda total de los sectores de riego.
- En relación al riesgo de inundaciones, y en base a la regulación y prácticas actuales, se adopta un nivel crítico de caudal máximo de 300 m³/s en las proximidades de la estación de aforos e Racarumi como un nivel aceptable.

Es importante mencionar que se expresaron preocupaciones sobre la degradación de la calidad del agua en la región de Cajamarca. De acuerdo con la Secretaria General del CRHC-CL, la afección de la calidad del agua se debe principalmente a los vertidos no controlados de efluentes domésticos y agrícolas en la parte alta y baja de la cuenca. Asimismo, debido a la geología de la región, el agua subterránea presenta de forma natural altos contenidos de metales como boro y arsénico. También se mencionó que existen pasivos ambientales mineros en la parte alta de la cuenca, así como minería informal, la cual puede tener un efecto sobre la calidad de agua en dicha zona.

Las actividades humanas en todas las escalas espaciales afectan tanto la cantidad como la calidad del agua. La alteración del paisaje y la vegetación asociada no solo cambia el balance hídrico, sino también los procesos que controlan la calidad del agua. Esto, sumado a un contexto de alta variabilidad y cambio climático genera, o puede generar, cambios importantes en la disponibilidad del recurso hídrico y su calidad. En tal sentido, es importante reconocer los efectos cíclicos y en cascada de las actividades humanas en la calidad y cantidad del agua a lo largo de las vías hidrológicas.

Una deficiente conservación ambiental y protección de los recursos hídricos de la cuenca Chancay-Lambayeque podría afectar la calidad y, por consiguiente, la disponibilidad de agua dulce a través del año y limitaría la sostenibilidad de los aprovechamientos. El clima tiene relación directa con los flujos de agua, que a su vez tiene un impacto en las concentraciones de diferentes componentes, alterando la calidad del agua. Este es un tema de vital importancia, especialmente en cuencas propensas a posible contaminación o altas concentraciones de componentes tóxicos, metales pesados o nutrientes (derivados de actividades industriales y agrícolas en la zona). La acumulación de estos elementos contaminantes en la tierra y el agua y su lenta degradación pueden generar, en el medio-largo plazo, impactos negativos en la disponibilidad de agua y en la salud de la población. Por consiguiente, el concepto de seguridad hídrica a escala de cuenca debe de contemplar el seguimiento y la evaluación de los riesgos asociados a la calidad (contaminación natural y/o antrópica) y cantidad (eventos hidrometeorológicos extremos como lluvias torrenciales e inundaciones y/o sequías).

A efectos del presente proyecto, y tras las reuniones de trabajo realizadas con las partes interesadas de Cajamarca y Chiclayo, se priorizó el análisis de los aspectos cuantitativos del agua frente a los cualitativos. Esta decisión se adoptó como resultado de la ausencia generalizada de datos y medidas de calidad del agua, y de los recursos necesarios para abordar un estudio de calidad. Como mínimo, un análisis cuantitativo requeriría al menos de: 1) mediciones periódicas de los parámetros físico-químicos y de calidad del agua, como temperatura y conductividad, pH, DBO/DQO y oxígeno disuelto, y contenido de nutrientes y metales pesados a lo largo del río Chancay-Lambayeque, y 2) una evaluación de las posibles fuentes puntuales y no puntuales de contaminación dentro de la cuenca. Se recomienda que tales mediciones se realicen en la cuenca para futuros estudios. Se resume a continuación las principales conclusiones derivadas de los talleres de trabajo en base al esquema de las 4Cs (*Consecuencias, inCertidumbres, opCiones, y Conexiones*) del DTF.

4.1.1 Consecuencias (indicadores de desempeño)

En el DTF, los indicadores de desempeño se utilizan para cuantificar el rendimiento del sistema (como responde) en relación con los desafíos clave identificados, estos son: la garantía de suministro de agua poblacional y de riego, y el riesgo de inundaciones.

Para cuantificar los déficits de suministro de agua, utilizamos indicadores de confiabilidad y vulnerabilidad.

La *confiabilidad* (R) se define como el porcentaje de meses en un periodo de análisis en los que se satisface plenamente la demanda objetivo (Hashimoto et al., 1982). Para su cálculo se utiliza una fórmula de confiabilidad agregada a nivel de sector (población, o riego) del que se deriva un único valor para todo el sistema de explotación:

$$R_S = \sum_{i \in S} w_i \frac{N - Nf_i}{N} * 100$$

donde

R_S Confiabilidad agregada, y promediada para el periodo de estudio, del sistema de explotación y referida al sector de demanda de agua S (poblacional, riego, minería, industrial). R adopta valores en el rango de de 0 a 100%.

i Representa todos los nodos de demanda pertenecientes al sector S considerado

Nf_i Número de meses en los que la demanda objetivo no fue alcanzada en el en el nodo i

N Número de meses en el período de análisis

w_i Peso normalizado asignado al nodo i en función de la magnitud de la demanda (sin unidad

La *vulnerabilidad* (V) se define como la intensidad promedio del volumen de demanda no satisfecho (déficits). Al igual que la confiabilidad, se define una medida agregada para cuantificar la vulnerabilidad en todo el sistema:

$$V_S = \sum_{i \in S} w_i \sum_j \frac{d_{i,j}/y_{i,j}}{Nf_i}$$

donde;

V Vulnerabilidad agregada, en MMC/mes y promediada para el periodo de estudio, del sistema de explotación y referida al sector de demanda de agua S (poblacional, riego, minería, industrial).

i Representa todos los nodos de demanda pertenecientes al sector S considerado

j Representa el mes en el que la demanda de agua no es satisfecha (déficit)

$d_{i,j}$ Déficit de agua (MMC/mes) en el nodo i para el mes con déficit j ,

$y_{i,j}$ Demanda de agua del nodo i en el mes en que existe el déficit $d_{i,j}$ (MMC/mes),

Nf_i : Número de meses en el nodo i en los que la demanda no es satisfecha.

Para cuantificar el riesgo de inundaciones se realiza un análisis de frecuencia de caudales máximos diarios observados anualmente en la estación de Racarrumi y sus periodos de retorno, así como del periodo de retorno del umbral crítico de caudal de 300 m³/s utilizado para alertar sobre el riesgo de inundaciones.

Por último se introducen dos indicadores adicionales que proporcionan una medida cuantitativa de la robustez y resiliencia del sistema de explotación bajo diferentes escenarios de cambio climático, y que son calculados en las Fases III y IV del DTF. En el

Cuadro 4.1 se resumen los diferentes indicadores empleados para la aplicación del DTF en la cuenca de Chancay-Lambayeque.

Cuadro 4.1 Definición y cálculo de los indicadores de robustez, resiliencia y periodo de retorno.

Indicador	Definición	Método de cálculo
Robustez para el abastecimiento de agua*	Capacidad del sistema para satisfacer de manera fiable la demanda de agua para una amplia gama de condiciones futuras	Porcentaje de proyecciones climáticas en las que el sistema de explotación es capaz de satisfacer las demandas con un nivel de confiabilidad predeterminado.
Resiliencia del suministro de agua*	Capacidad del sistema para recuperarse rápidamente de una condición de déficit en una amplia gama de condiciones climáticas futuras	Encontrar la relación entre las recuperaciones del sistema y el número total de errores en todos los escenarios de stress test y calcular el valor medio
Período de retorno del nivel crítico de descarga	Probabilidad media de sobrepasar el nivel crítico de descarga bajo una amplia gama de futuros	Encontrar el intervalo de recurrencia del nivel de descarga crítica especificado en todos los escenarios del stress test y calcule el promedio

* Reportado por separado para demanda poblacional y de riego.

4.1.2 Incertidumbres

Basados en los aportes recibidos durante las reuniones de inicio, definimos una lista inicial de incertidumbres climáticas y no climáticas para el análisis de la fase II.

Las incertidumbres climáticas son:

- Cambios en la temperatura media en relación con la media histórica (1970-2010)
- Cambios en la precipitación media en relación con la media histórica (1970-2010)
- Cambios en la ocurrencia de épocas lluviosas (enero-abril) en relación con el período histórico (1970-2010)

Las incertidumbres no climáticas incluyen:

- Cambios en la demanda de agua doméstica en relación con el nivel histórico (1970-2010)
- Cambios en la demanda de agua de riego en relación con el nivel histórico (1970-2010)
- Cambios en la tasa de acumulación de sedimentos para evaluar las reducciones en la capacidad de almacenamiento activo de la Presa Tinajones debido a la deposición de sedimentos

- Cambios en la transferencia de agua entre los ríos Chotano y Conchano y la cuenca Chancay-Lambayeque, en relación con el nivel histórico (1970-2010)

4.1.3 Opciones (intervenciones)

Se identificó una lista de diez posibles intervenciones para la cuenca Chancay-Lambayeque basada en una revisión inicial de la literatura (informe de Plan de Gestión y el plan Hidráulico). Estas diez intervenciones se muestran en el Cuadro 4.2 y la Figura 4.1.

Cuadro 4.2 La lista inicial de diez intervenciones consideradas

	Alternativa	Capacidad (MMC)	Estimación de costo (Mil. US\$)*
1	Presa Rio Chancat (Cumbil)	50.00	202
2	Presa Majin	20.70	94
3	Presa Juana Rios (Pala Blanco)	18.30	77
4	Presa La Montería	70.00	168
5	Presa Ampliación Tinajones	34.10	211
6	Presa Rio Loco	4.50	23
7	Represa Pisit	6.50	19
8	Presa Sicán	80.00	158
9	Uso de agua subterránea	150.00	30
10	Infraestructura Natural**	24,000 ha	71

*Fuente: ANA (2015). Los costos estimados hacen referencia a costos de capital.

** Los valores de capacidad y coste corresponden a un proyecto de restauración y manejo sostenible optimizado que considera las actuaciones más costo-efectivas para un conjunto limitado de subcuencas. Ver la sección 8.2.1 y el apéndice A7 para una descripción detallada de la opción de Infraestructura Natural.

Durante el taller de inicio, junto con las partes interesadas, se priorizaron cuatro proyectos de intervención: (1) Presa Sicán, (2) Presa La Montería, (3) Uso de agua subterránea, y (4) Infraestructura Natural.

Adicionalmente se recaló la necesidad de incluir en el análisis el nuevo proyecto de irrigación Chota (departamento de Cajamarca) en los escenarios futuros de desarrollo de la cuenca. Si el análisis de la Fase III (Prueba de Estrés Climático) muestra riesgos futuros sustanciales para el sistema, estas opciones se considerarán en la Fase IV (Gestión del Riesgo Climático) para mejorar la robustez y la resiliencia del sistema. Esto se hará definiendo diferentes portafolios de actuación (intervenciones aisladas o en combinación) y evaluando cada una de estos portafolios para los escenarios climáticos y de desarrollo de la cuenca especificados.

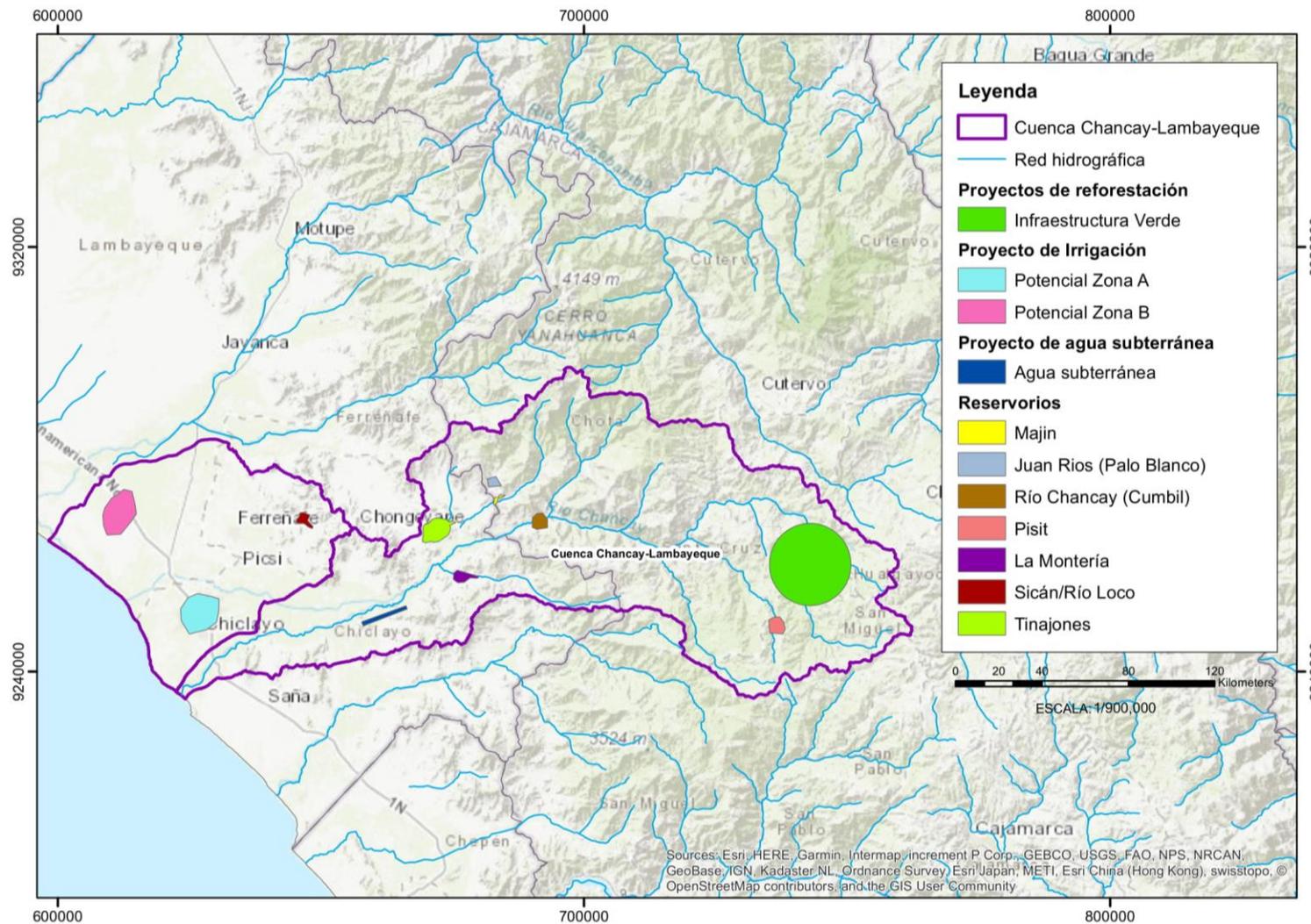


Figura 4.1 Listado y ubicación aproximada de las opciones de intervención inventariadas en la cuenca de Chancay-Lambayeque

A continuación, se hace una breve descripción de las cuatro intervenciones seleccionadas:

Alternativa 1: Presa Sicán (SI)

La descripción del proyecto Sicán ha sido extraída del Volumen I del Estudio de Pre-Inversión a nivel de perfil del proyecto denominado “INSTALACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO SICÁN PARA MEJORAR EL SISTEMA DE RIEGO EN EL VALLE CHANCAY – LAMBAYEQUE, DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE”. Este proyecto tiene como característica principal el mejoramiento de la seguridad hídrica de todos los usuarios del valle Chancay – Lambayeque, actualmente atendidos con el Proyecto Tinajones.

El proyecto contempla, principalmente, la derivación y regulación de parte de las aguas del sistema hidráulico Tinajones en un nuevo embalse (Sicán), una presa de almacenamiento y regulación de avenidas máximas del río Loco, líneas de distribución de agua para riego y obras de encauzamiento de los excedentes del embalse. La capacidad de almacenamiento del embalse se prevé en 80 MMC y un costo de aproximado de 428.7 millones de Nuevos Soles.

En este sentido, el proyecto contempla los objetivos específicos siguientes:

- Eficiencia de Riego: Mejorar la eficiencia en el manejo del agua de riego en 10 000 ha,
- Prevención: Proteger el canal Taymi y la ciudad de Ferreñafe, frente al riesgo de desastres por inundaciones causadas por desbordes de la quebrada Río Loco.

Alternativa 2: Presa La Montería (MO)

De acuerdo con la Memoria General del estudio de pre-inversión del Proyecto de Inversión Pública denominado “INSTALACIÓN DE LA PRESA DE EMBALSE MONTERÍA Y OBRAS CONEXAS, DISTRITO DE CHONGOYOPE, PROVINCIA DE CHICLAYO, DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE”, el proyecto consiste en la construcción del embalse La Montería, con una capacidad de embalse de hasta 77 MMC y un costo aproximado de 431.1 millones de Nuevos Soles. El objetivo principal es dar soluciones necesarias para recuperar la capacidad de regulación del Sistema Hidráulico Tinajones (el cual actualmente presenta problemas graves de sedimentación) y garantizar la sostenibilidad de la oferta hídrica en el valle Chancay – Lambayeque ante una eventual contingencia en la presa Tinajones. En este sentido este proyecto busca garantizar la captación, control, regulación y protección de las áreas agrícolas del valle Chancay – Lambayeque, de tal manera que el recurso hídrico llegue a los cultivos en forma oportuna y eficiente, como el abastecimiento para el consumo poblacional.

El ámbito de intervención del proyecto, como se menciona en la denominación del mismo, se ubica en la localidad Centro Poblado Tablazos, distrito de Chongoyape, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

Alternativa 3: Uso de agua subterránea (AS)

En lo que respecta a las fuentes de abastecimiento de agua potable, en el Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la Cuenca Chancay – Lambayeque, se especifica que las fuentes de abastecimiento corresponden al agua superficial proveniente del río Chancay-Lambayeque para los grandes centros urbanos y poblados de la cuenca media y alta, y para el caso de los distritos y zonas rurales con agua subterránea proveniente de pozos.

Asimismo, en el PGRH se señala que el ex-INRENA presenta información que registra 2602 pozos, 1664 son de tajo abierto (63.95%), 915 son tubulares (35.17%) y 23 mixtos (0.88%). De este total, según inventario del año 2009, 1314 pozos se encuentran operativos, 978 utilizables y 310 no utilizables. En el marco del proyecto especial Olmos-Tinajones, se contempla la implementación del proyecto denominado “Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en el Valle Chancay- Lambayeque”, el cual contempla la excavación de 141 nuevos pozos en un lapso de 5 años que proveerán 150 MMC adicionales al sistema. El costo aproximado es de 665 mil de dólares.

Alternativa 4: Infraestructura natural (IN)

La propuesta de Intervención Natural considerada en este trabajo incluye actuaciones de manejo sostenible de la cobertura vegetal, y actividades de forestación, reforestación, agroforestales y agrosilvoculturales en la parte alta y media de la cuenca (región de Catamarca). El conjunto de intervenciones analizadas se ha consensuado en coordinación con los trabajos realizados en el marco del proyecto “Infraestructura Natural para las Seguridad Hídrica”. Entre las actuaciones consideradas se excluyen otros tipos de infraestructura natural como por ejemplo la creación de áreas naturales para la retención de agua o la recarga de acuíferos. En general, los cambios de cobertura y de manejo sostenible asociados a los proyectos de IN tendrían efectos positivos en la hidrología local a través del aumento de la infiltración y la reducción de los volúmenes de escorrentía superficial.

Para el presente estudio se ha considerado un escenario optimizado de intervención que incluye la combinación de diferentes actuaciones localizadas en las cuencas donde se han cuantificado los mayores ratios coste-efectividad en términos de aumento de los caudales base durante el periodo de estiaje. El total de superficie intervenida rondaría las 24.000 ha, más de 9000 contribuyentes y un coste aproximado de 71 Mil. US\$. Una descripción detallada de las actuaciones y su localización se describe en el Apéndice A7.

4.1.4 Conexiones (modelos)

La Figura 4.2 ilustra el esquema del sistema de recursos hídricos incluyendo el reservorio existente (Tinajones) y las cuatro intervenciones (opciones) que se considerarán. Como se puede observar, el sistema está conectado al sistema trasvase Chotano-Conchano que aporta agua al río Chancay. Hasta la estación de Racarumi y el canal de derivación de Tinajones, el río Chancay recibe aportes de diferentes afluentes por su margen derecho e izquierdo. A partir de la estación de Racarumi, el sistema pasa a considerarse como regulado (sistema regulado de Tinajones). Aguas abajo de la confluencia con el río Tablazo, la mayoría del agua que discurre por el río se deriva hacia los diferentes sectores de riego a través de un sistema de canales de riego. Los retornos de riego se descargan al mar a través de un sistema de canales de drenaje. Los diferentes proyectos contemplados para mejorar el desempeño del sistema se incluyen en la figura utilizando una simbología específica. Todas las intervenciones naturales de manejo sostenible y restauración de la cobertura vegetal están localizadas en la cabecera de la cuenca (sector no regulado), mientras que el aumento de la explotación de aguas subterráneas, y las presas de Sican (conectada a Tinajones) y La Montería (sobre el río Tablazo) quedan ubicadas en el sector regulado de la cuenca.

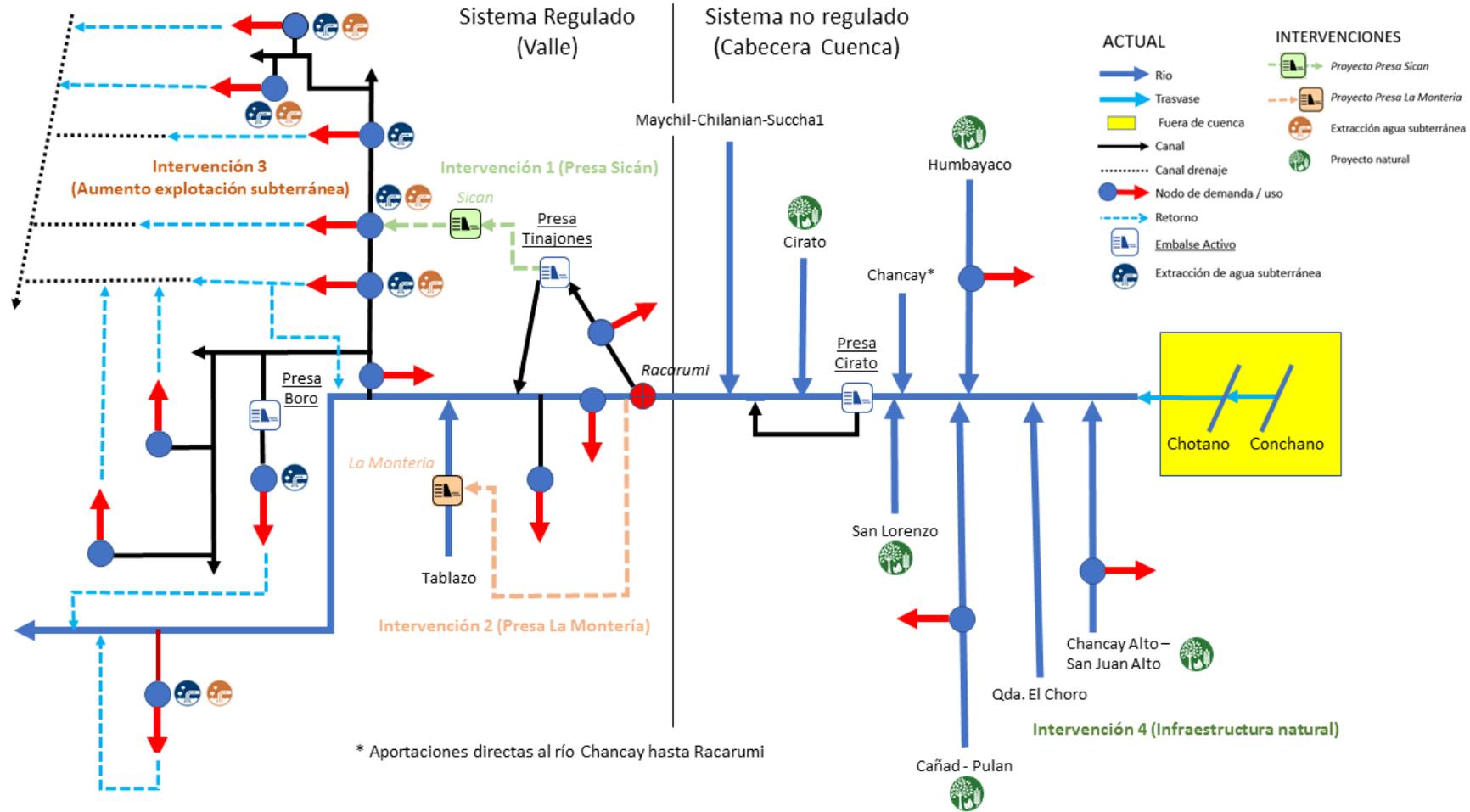


Figura 4.2 Esquema del sistema de recursos hídricos incluyendo el reservorio existente (Tinajones) y las cuatro intervenciones seleccionadas

Debido a la complejidad del sistema mostrado, se utilizarán una serie de modelos de simulación para evaluar los efectos del clima y los cambios no climáticos en el sistema de recursos hídricos (con y sin las carteras de intervenciones). La hidrología de la superficie de la cuenca se simulará utilizando un modelo de hidrología semi-distribuido HydroBID (Ver Apéndice A.3). La aplicación del modelo HydroBID toma series temporales diarias de precipitación y temperatura como variables de entrada en cada subcuenca, y proporciona estimaciones de caudal diario en sus puntos de descarga (estación Racarumi). El flujo simulado de HydroBID se convierte luego en un paso de tiempo mensual y se ingresa a un modelo de evaluación y asignación de recursos hídricos. En este estudio, utilizamos una aplicación de modelo WEAP existente del sistema para simular las asignaciones mensuales de agua y las operaciones del reservorio dentro del sistema (consulte el Apéndice A.3).

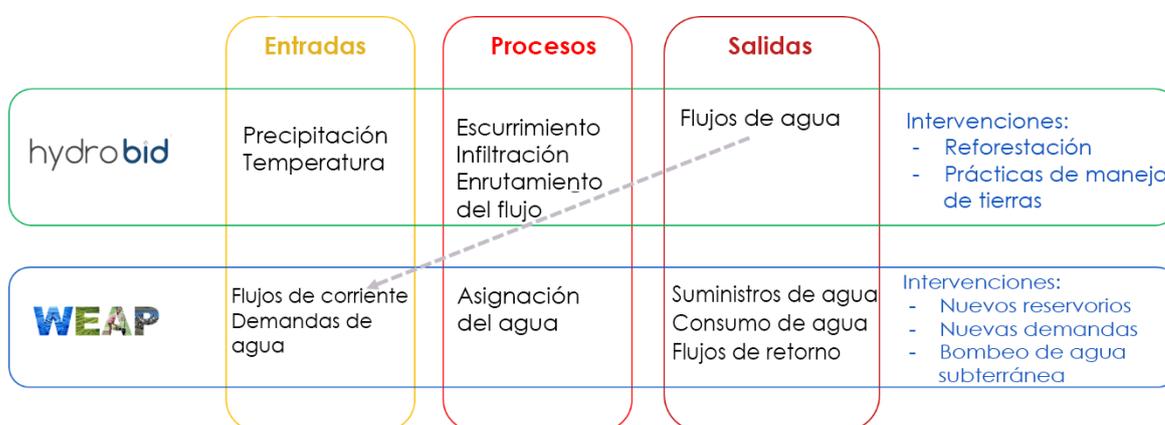


Figura 4.3 Diagrama conceptual representativo de las conexiones empleadas en el estudio (modelos HydroBID y WEAP)

4.2 Síntesis

El propósito del análisis de la Fase I es definir el contexto del estudio y decidir rápidamente si el sistema Chancay-Lambayeque tiene sensibilidades climáticas y no climáticas medibles.

Los objetivos de suministro de agua y gestión del riesgo de inundación para el sistema Chancay-Lambayeque, dependen en gran medida de las condiciones climáticas y demográficas futuras. Las incertidumbres climáticas futuras pueden afectar la magnitud y la distribución del flujo de la superficie que, a su vez, altera la cantidad de agua disponible para consumo, así como la aparición de inundaciones. Otros cambios, como los niveles de demanda de agua, la tasa de acumulación de sedimentos y la transferencia de agua entre cuencas también pueden generar vulnerabilidades adicionales para el sistema Chancay-Lambayeque. Por lo tanto, concluimos que se necesita una exploración cuantitativa de las sensibilidades del desempeño del sistema al clima y los factores no climáticos.

5 Análisis de datos hidroclimáticos

5.1 Análisis de los datos climatológicos históricos

5.1.1 Descripción de los datos disponibles

Los datos climatológicos históricos para Chancay-Lambayeque se obtienen de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). El conjunto de datos incluye series temporales diarias de la precipitación (mm) y la temperatura promedio (°C) de las estaciones meteorológicas de Cayalti (CAY), Reque (REQ), Jayanca (JAY), Chugur (CHU), Cbaños (CBA), Llama (LLA), Cochabamba (COC), Cutervo (CUT) y El Espinal (EESP), respectivamente.

La Figura 5.1 muestra las ubicaciones de estas nueve estaciones, mientras que en el Cuadro 5.1 se presenta información adicional incluyendo las coordenadas y altitudes geográficas.

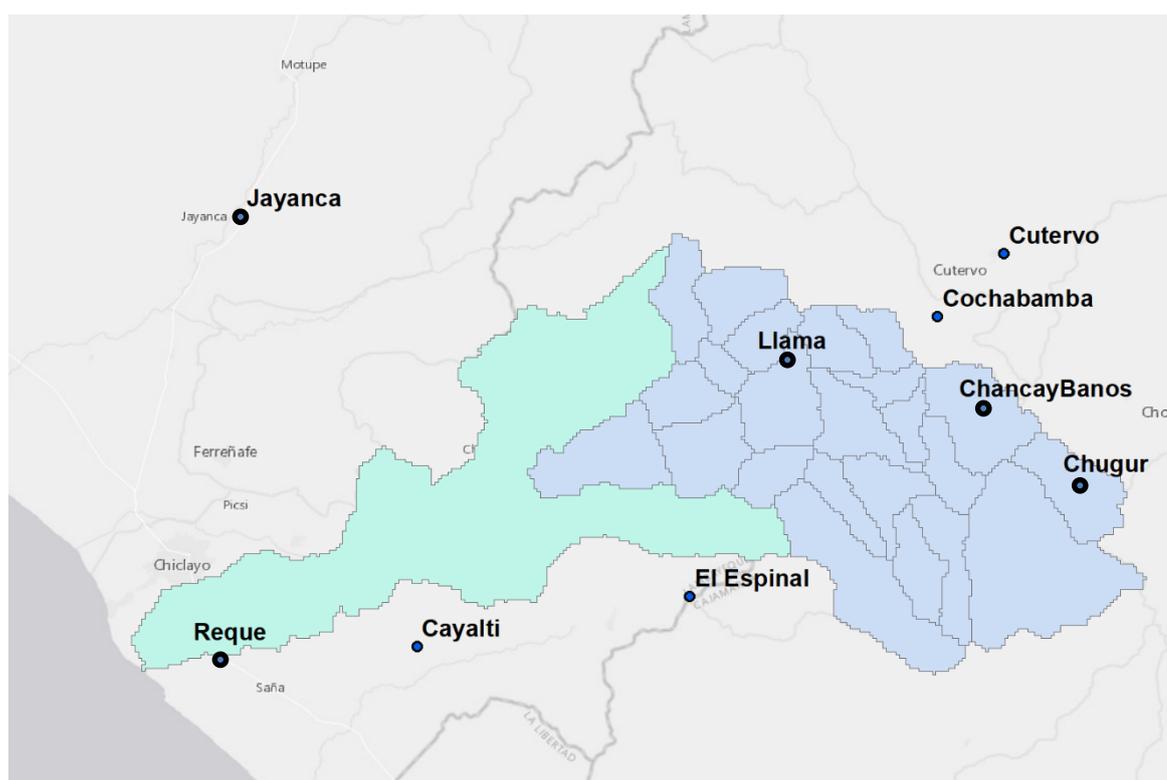


Figura 5.1 Localización de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio. En azul se representa el área de contribución al reservorio de Tinajones. En verde, el área de drenaje al valle Chancay-Lambayeque.

Cuadro 5.1 Resumen de la información para las estaciones meteorológicas cerca de la cuenca Chancay-Lambayeque

Nombre	Acrónimo	Provincia/ Región	Latitud (GMS)	Longitud (GMS)	Altitud (m.s.n.m.)
Cayalti	CAY	Chiclayo (Lambayeque)	6 52 50.86	79 32 49.25	90
Reque	REQ	Chiclayo (Lambayeque)	6 53 10.07	79 50 7.8	13
Jayanca	JAY	Lambayeque (Lambayeque)	6 19 53.73	79 46 7.29	78
Chugur	CHU	Hualgayoc (Cajamarca)	6 40 15.28	78 44 13.81	2757
Chancay Bano	CBA	Santa Cruz (Cajamarca)	6 34 30	78 52 2	1677
Llama	LLA	Chota (Cajamarca)	6 30 51.95	79 7 21.43	2096
Cochaba mba	COC	Chota (Cajamarca)	6 27 36.32	78 53 18.97	1653
Cutervo	CUT	Cutervo (Cajamarca)	6 22 46.7	78 48 18.44	2668
El Espinal	EESP	Chiclayo (Lambayeque)	6 49 2.87	79 12 5.97	371

La muestra que los datos de las nueve estaciones varían sustancialmente en base en su período de cobertura. Entre estas estaciones, Cayalti tiene las series más largas (desde 1937 hasta 2013), y Chancay Baños tiene las más cortas (desde 1987 hasta 2013). Los registros meteorológicos también muestran series discontinuidades debido a la falta de observaciones.

La Figura 5.2 muestra que los datos de las nueve estaciones varían sustancialmente en base en su período de cobertura. Entre estas estaciones, Cayalti tiene las series más largas (desde 1937 hasta 2013), y Chancay Baños tiene las más cortas (desde 1987 hasta 2013). Los registros meteorológicos también muestran series discontinuidades debido a la falta de observaciones. Cabe señalar que como se muestra en las Figuras, no se cuenta con información del registro de temperatura de la estación Chungur.

La Figura 5.3 ilustra las diferencias de altitud entre las estaciones en las regiones Lambayeque y Cajamarca. Las elevaciones de las estaciones van desde los 13 a los 371 metros en Lambayeque, y los 1653 a los 2757 metros en Cajamarca.

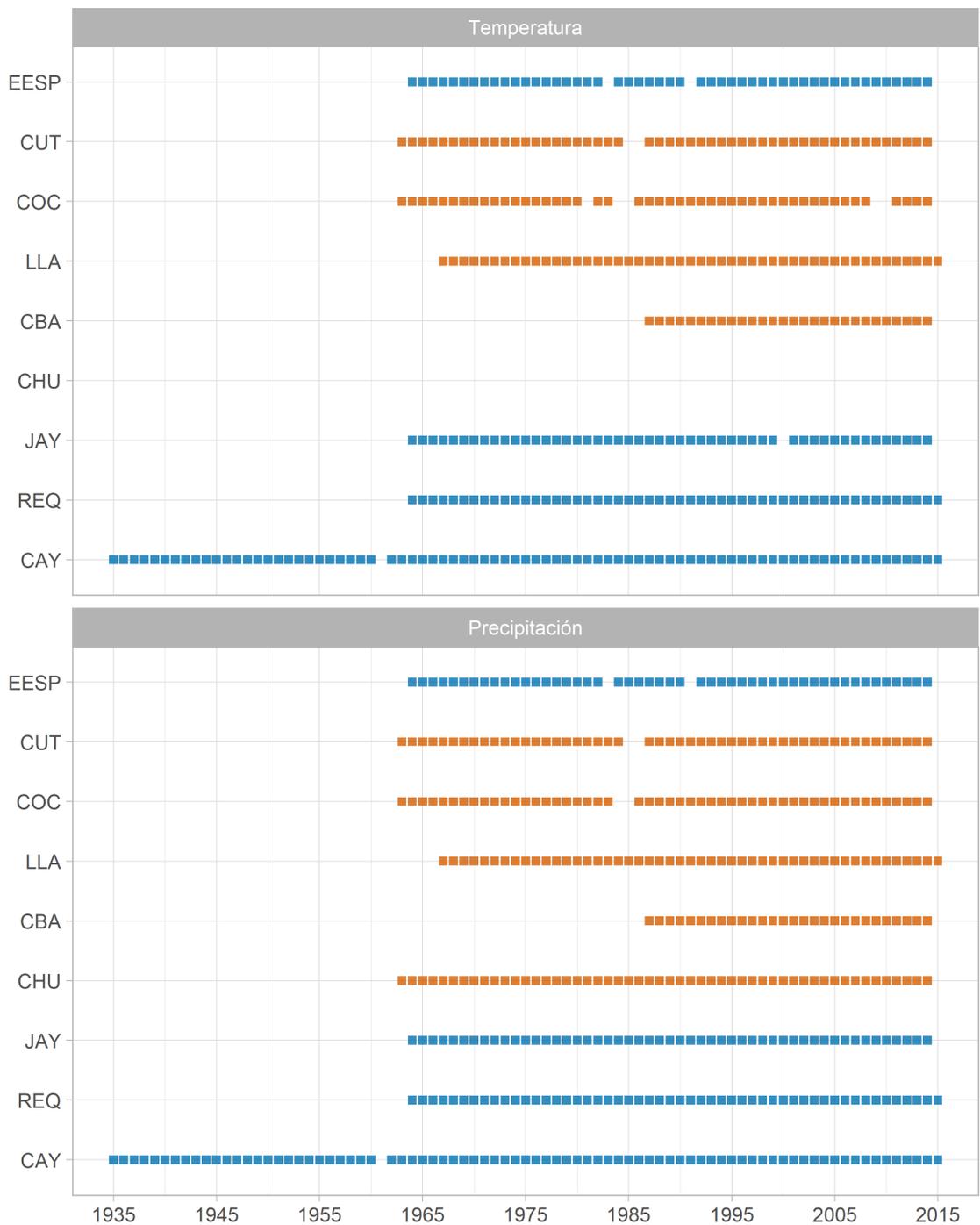


Figura 5.2 Periodo con registro de datos en las estaciones meteorológicas ubicadas en el departamento de Lambayeque (azul) y Cajamarca (naranja)

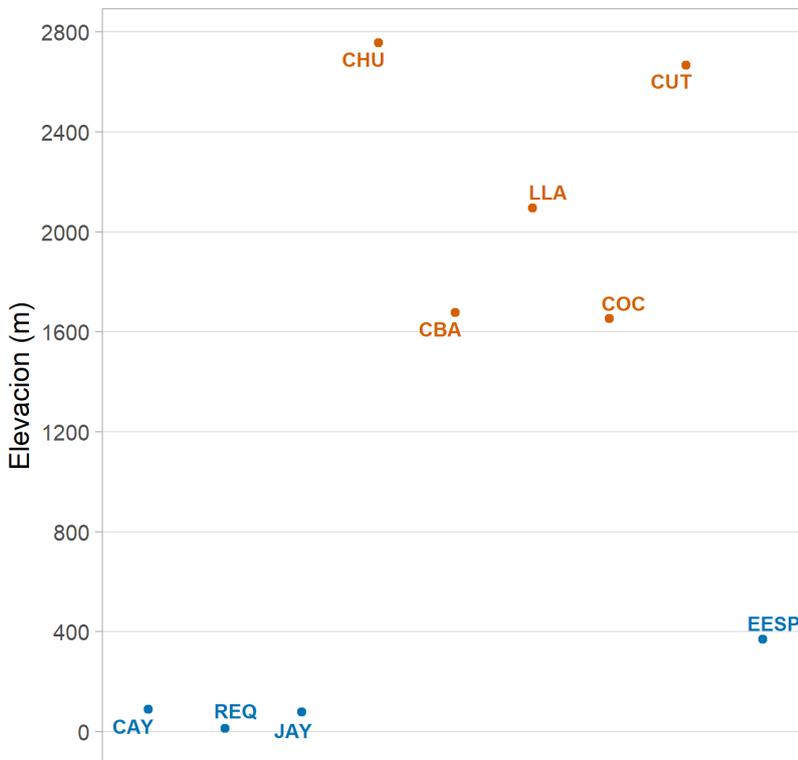


Figura 5.3 Elevaciones de estación (azul = región Lambayeque, naranja = región Cajamarca)

5.1.2 Correlaciones espaciales en los datos climáticos

La variabilidad espacial en los datos climáticos históricos anuales se evalúa utilizando los datos de las mismas nueve estaciones. Utilizamos el coeficiente de Pearson¹ como la medida de dependencia lineal entre dos series temporales de variables climáticas de diferentes ubicaciones. El valor de 1 en r de Pearson significa que las series temporales se mueven en perfecta armonía (correlación lineal positiva total), mientras que una correlación de -1 significa que las series temporales se mueven en dirección completamente opuesta (correlación lineal negativa total). Una correlación de 0 significa que no hay relación entre las variables. Debido a las diferencias en las longitudes de los datos de estación disponibles, la correlación entre cada par de variables es computada utilizando todos los pares completos de observaciones en dichas variables.

¹ El Coeficiente de Correlación de Pearson es el método más común de determinar si existe asociación lineal entre dos variables cuantitativas continuas, usualmente representado por la letra R . Debido a que se suele utilizarse una muestra, lo que se obtiene en realidad es un estimado del coeficiente de correlación poblacional, r . Dos aspectos importantes del coeficiente de correlación son su magnitud y su signo. La magnitud refleja la intensidad de la asociación entre las dos variables; el valor absoluto de la magnitud puede variar entre cero y uno. Valores cercanos a cero indican que las variables no están asociadas, es decir, que el valor de una variable es independiente del valor de la otra. Cuando la relación es positiva, indica una relación directa entre las variables, si es negativo, indica una relación inversa. Fuente: Camacho-Sandoval, J. (2008).

Figura 5.4 muestra las matrices de correlación para las series de precipitación diaria y mensual. A nivel diario, el valor en r de Pearson varía desde 0.07 a 0.42. Para la precipitación mensual, el valor en r de Pearson varía desde 0.2 a 0.89 y por lo tanto indica un nivel más alto de correlación en comparación con los datos diarios. De manera similar, la Figura 5.5 muestra las matrices de correlación para las series diarias y mensuales de temperatura de las nueve estaciones meteorológicas. La correlación espacial en temperatura depende altamente de la región geográfica y la altitud de la estación. Los resultados muestran que las estaciones de Lambayeque (CAY, REQ y JAY) tienen coeficientes de relación de aproximadamente 0.9 o más altos. LLA (Cajamarca) es inversamente correlativa con las demás estaciones en ambas escalas temporales.

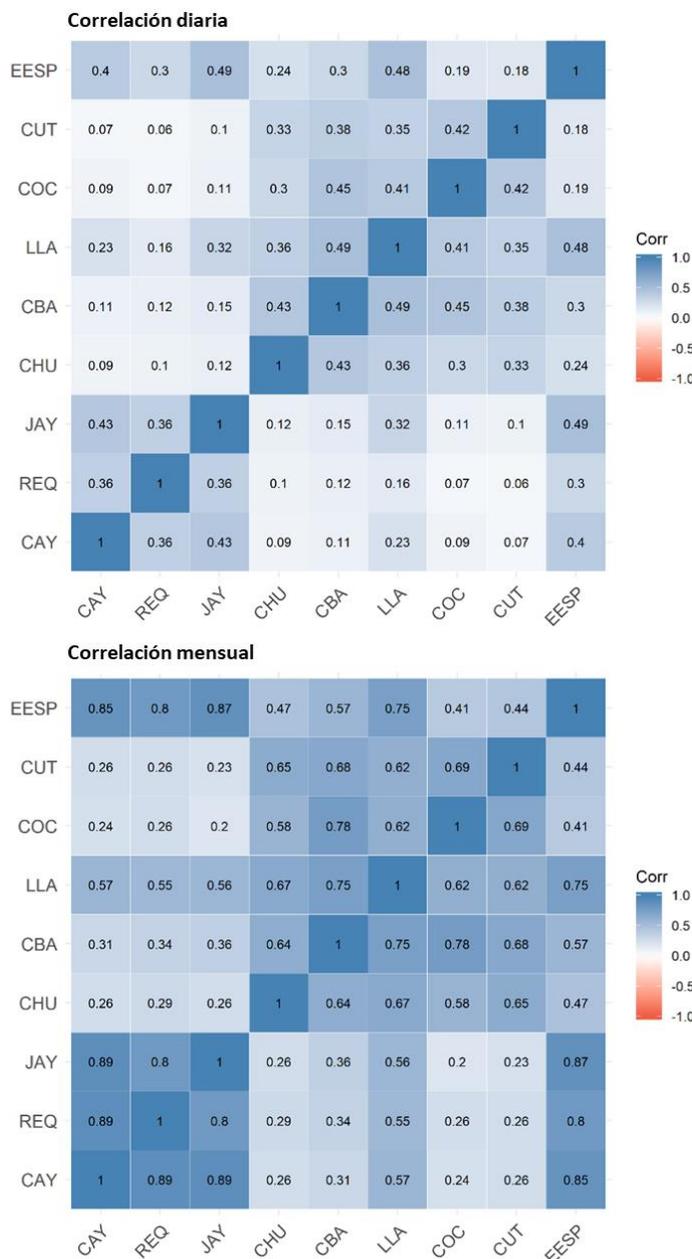


Figura 5.4 Correlaciones diarias y mensuales en la temperatura histórica a través de las nueve estaciones meteorológicas

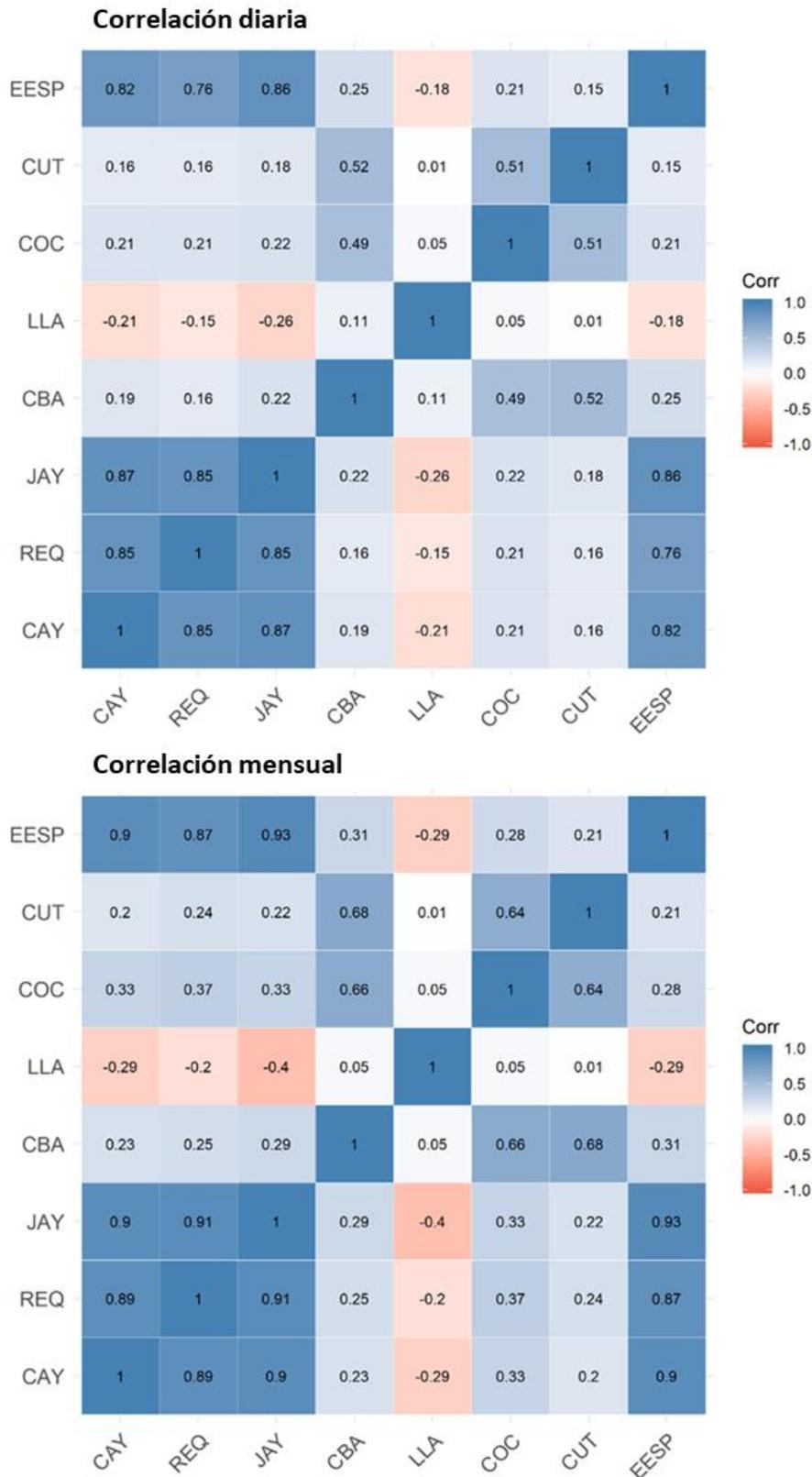


Figura 5.5 Correlaciones diarias y mensuales en la temperatura histórica a través de las nueve estaciones meteorológicas

5.1.3 Análisis de la tendencia de las variables climáticas

Analizamos las tendencias históricas en precipitación y temperatura anuales para cada estación, así como para los promedios a lo largo de las regiones Lambayeque y Cajamarca. También utilizamos la prueba Mann-Kendall ²(Kendall, 1975) para probar la significancia estadística de las tendencias.

En las Figura 5.6 y Figura 5.7 se muestran las tendencias históricas en las series de precipitación y temperatura media anuales para las estaciones analizadas, mientras que en las Figura 5.8 y Figura 5.9 se representa la tendencia observada en la cuenca tras promediar espacialmente para los departamentos de Lambayeque y Cajamarca. En se recogen los valores de significancia estadística según la prueba Mann-Kendall para las tendencias mostradas en las Figuras de 5.7 a 5.10. En general se observan tendencias positivas en los valores de precipitación media anual algo más acentuadas en las estaciones de la cabecera de la cuenca (estadísticamente significativos en CBA, CUT, CHU y JAY). Para el caso de la temperatura las tendencias no son tan claras e incluso existen patrones dispares incluso en estaciones pertenecientes al mismo departamento (tendencia negativa significativa en CBA vs positiva en LLA ambas estaciones en el departamento de Cajamarca). Para ambas variables, vemos una periodicidad multianual (variabilidad de baja frecuencia). El patrón periódico es sustancial en las estaciones de Lambayeque, con años extremadamente húmedos en la década de 1970, a principios de la década de 1980 y a finales de la década de 1990. Esta periodicidad de extremos puede atribuirse al fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO), el cual será tratado con mayor detalle en la siguiente sección.

Cuando se analizan las series ponderadas espacialmente por departamento, Figura 5.8 observa un ligero incremento, aunque no significativo estadísticamente, en la precipitación media anual en el departamento de Lambayeque. Se observan años extremadamente húmedos con valores superiores a 500 mm/año. La precipitación media anual ponderada en el departamento de Lambayeque muestra una tendencia más fuerte ($p\text{-level} < 0.05$) con períodos multianuales alternados entre húmedos y secos. También se ha observado un incremento estadísticamente significativo en la temperatura media anual en ambas regiones.

² El propósito de la prueba Mann-Kendall (MK) (Mann 1945, Kendall 1975, Gilbert 1987) es evaluar estadísticamente si existe una tendencia monótonica hacia arriba o hacia abajo de la variable de interés en el tiempo. Una tendencia hacia arriba (hacia abajo) monótona significa que la variable aumenta (disminuye) de manera constante a través del tiempo, pero la tendencia puede o no ser lineal. La prueba MK se puede usar en lugar de un análisis de regresión lineal paramétrica, que se puede usar para probar si la pendiente de la línea de regresión lineal estimada es diferente de cero. La prueba MK evalúa la posibilidad de rechazar la hipótesis nula (H_0 , no existe tendencia monótonica) o aceptar la hipótesis alternativa (H_1 , existe tendencia monótonica). Fuente: Pacific Northwest Laboratory.

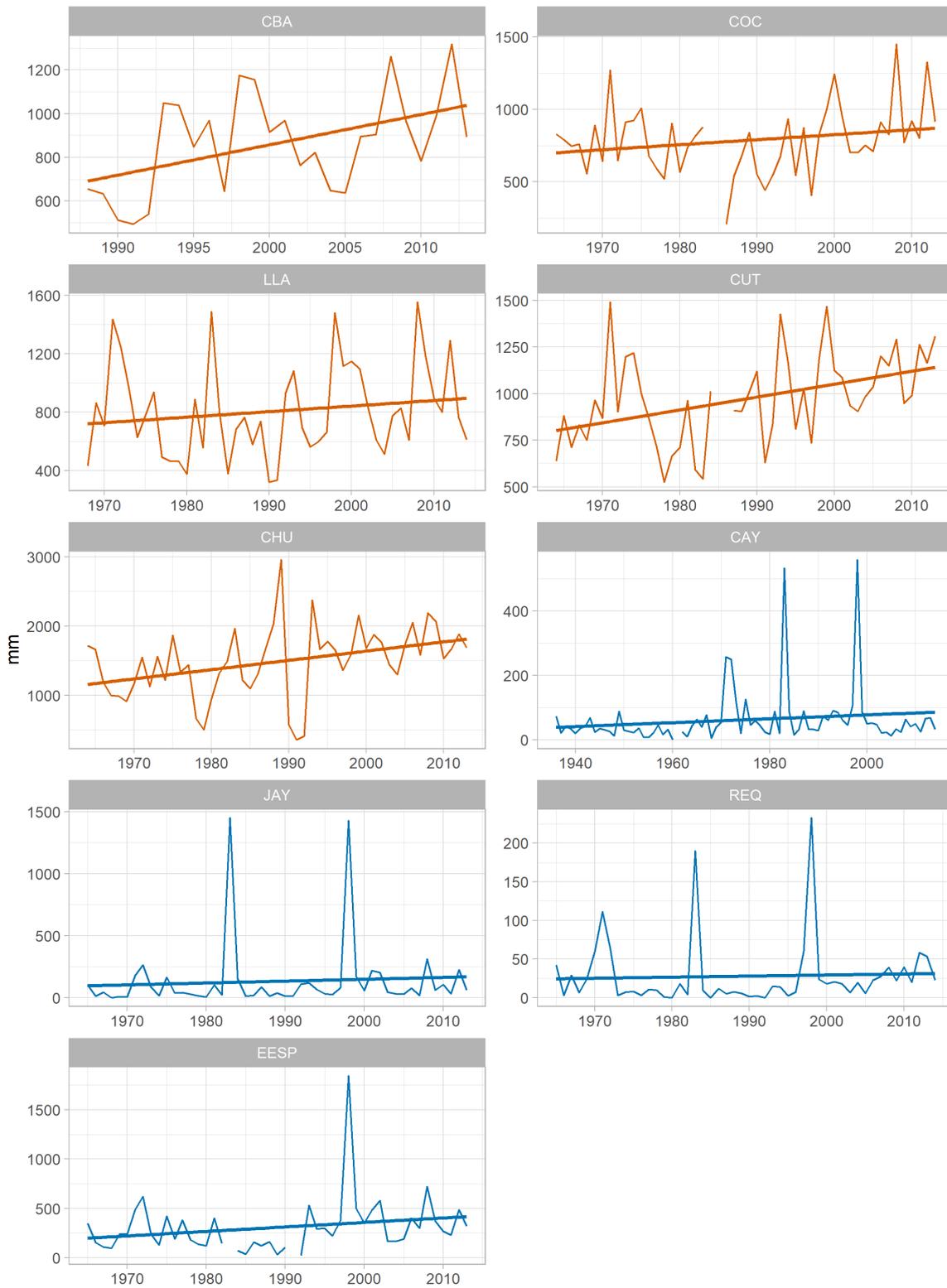


Figura 5.6 Tendencias históricas en la precipitación media anual (mm/año) en las nueve estaciones meteorológicas bajo estudio (azul = estaciones de Lambayeque, naranja = estaciones de Cajamarca)

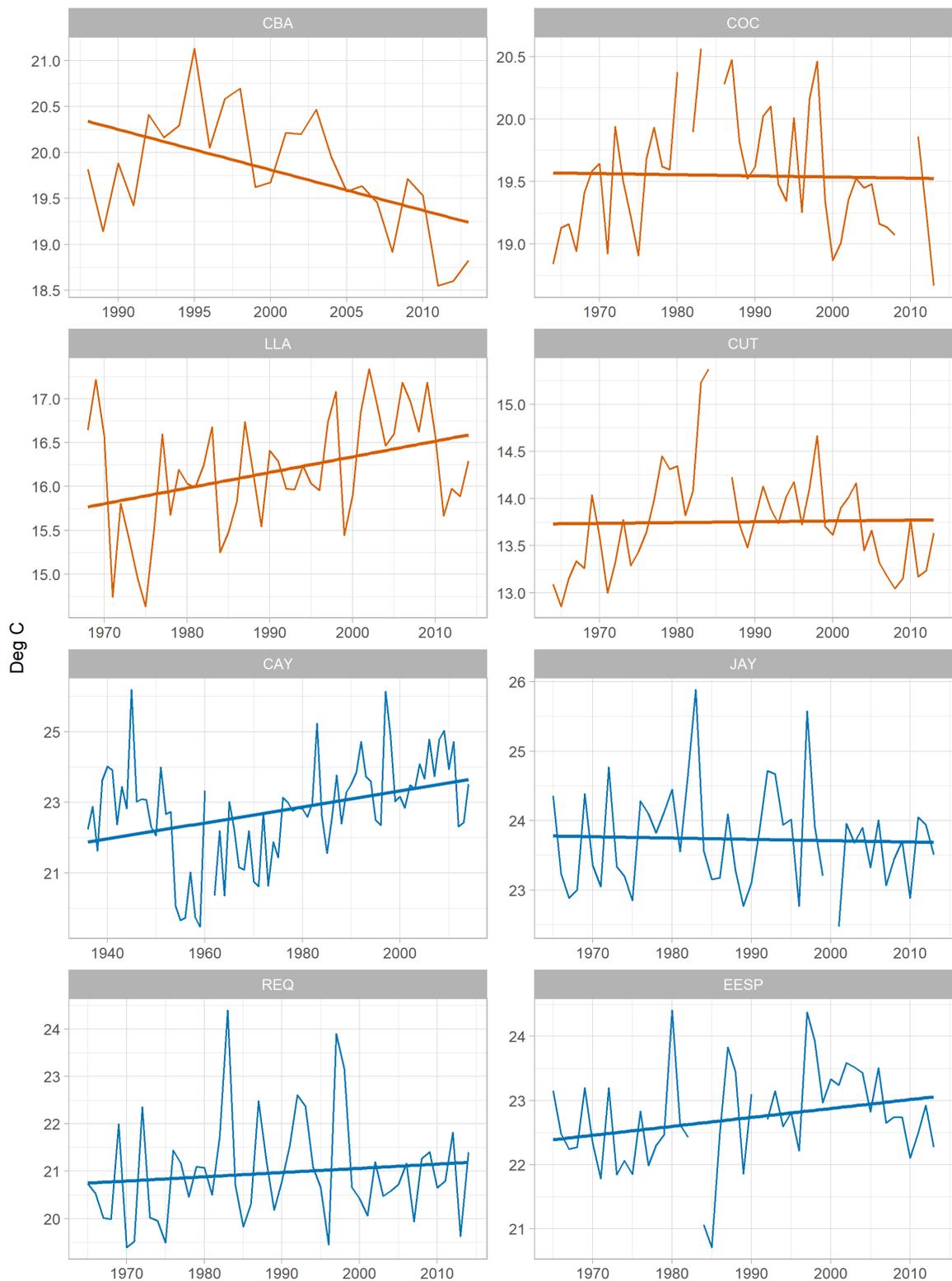


Figura 5.7 Tendencias históricas en la temperatura media anual (°C) observada en las nueve estaciones meteorológicas analizadas (azul = estaciones de Lambayeque, naranja = estaciones de Cajamarca)

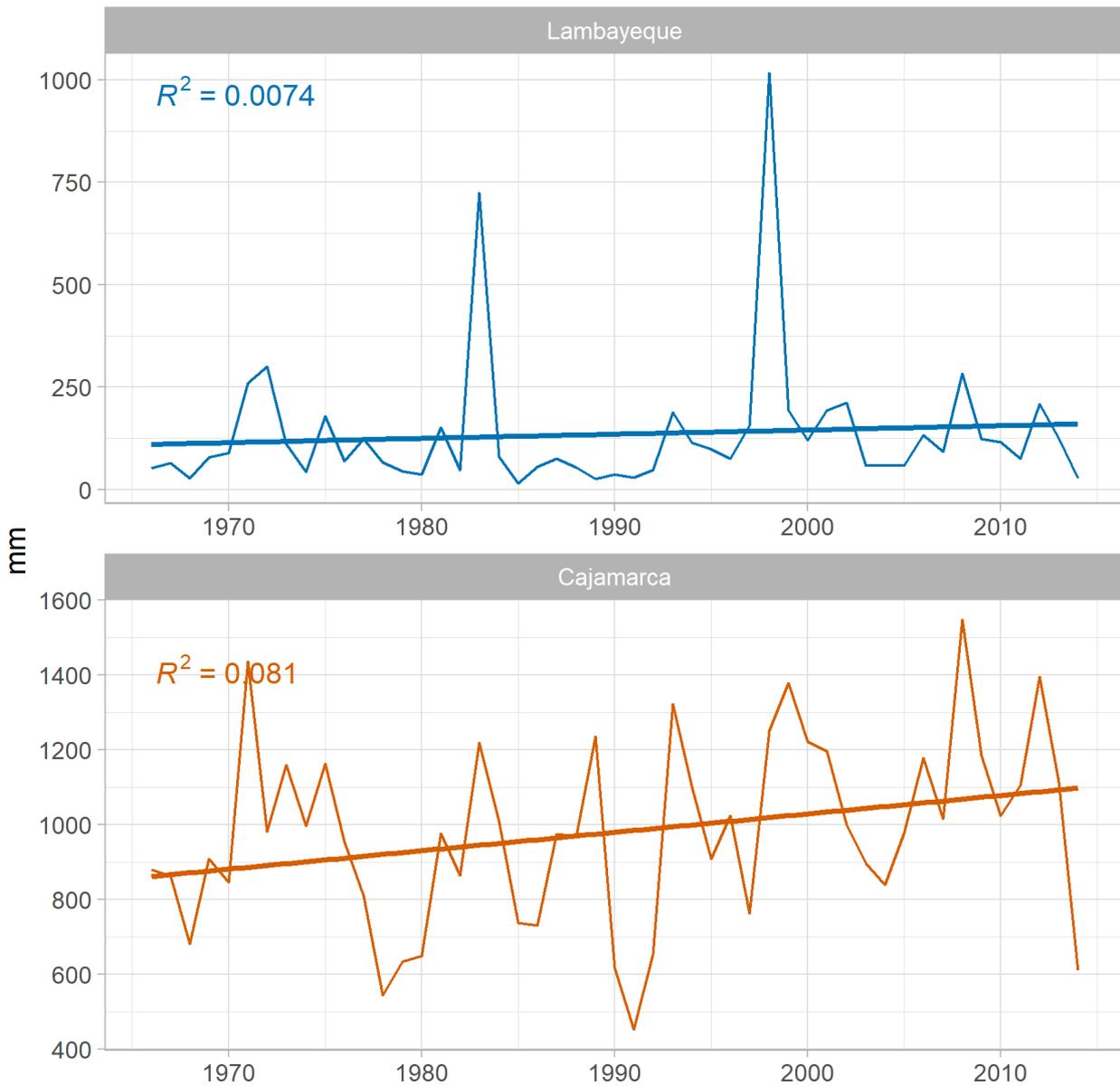


Figura 5.8. Tendencias históricas en la precipitación media anual (mm) en los departamentos de Lambayeque (azul) y Cajamarca (naranja).

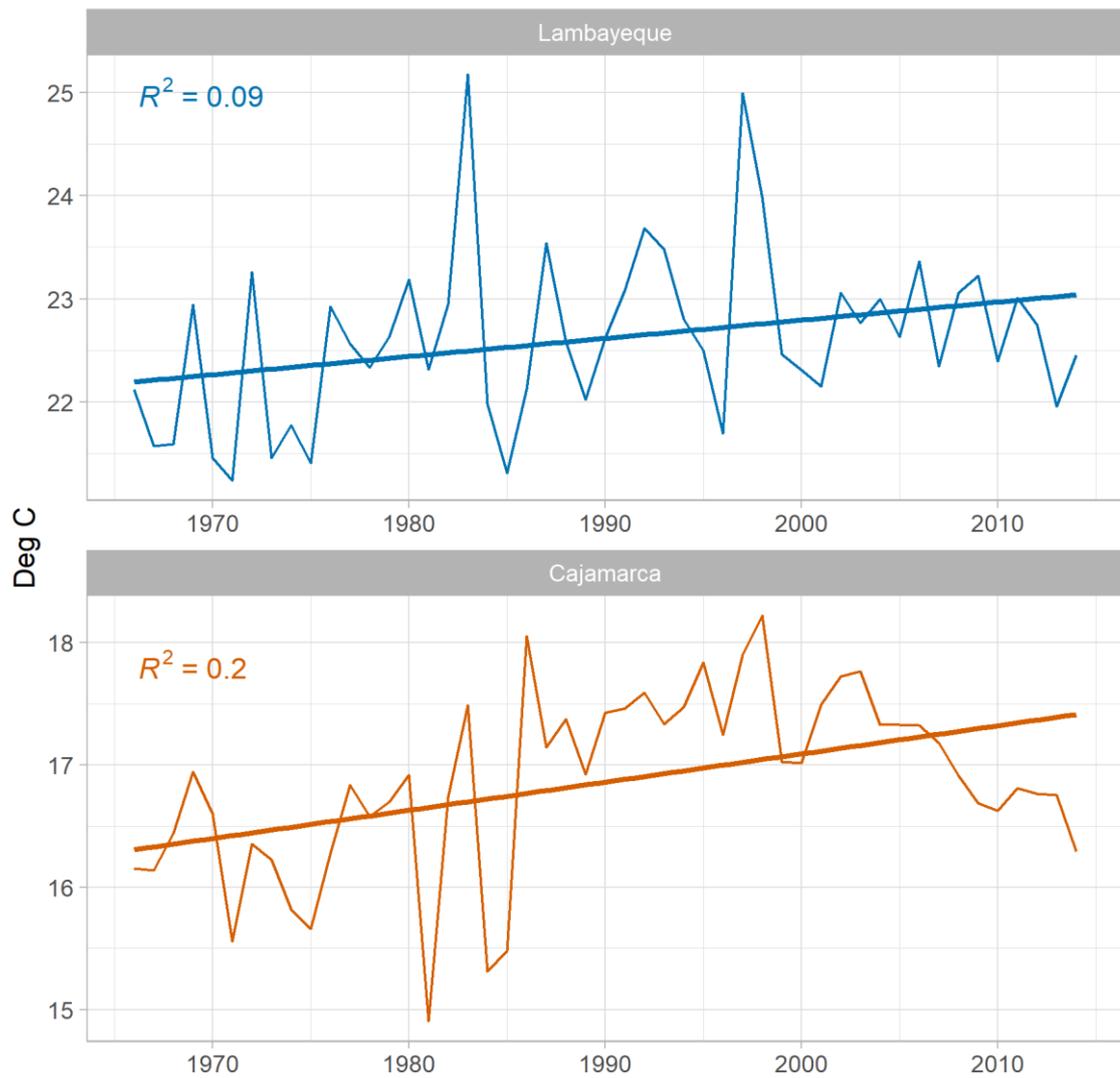


Figura 5.9. Tendencia histórica en la temperatura media anual (°C) en los departamentos de Lambayeque (azul) y Cajamarca (naranja).

Cuadro 5.2 Estadísticas de la prueba de tendencias Mann-Kendall para las series de precipitación y temperatura históricas anuales para los promedios de las nueve estaciones y de las 2 regiones. Las estadísticas tau de Mann-Kendall muestran la señal y fuerza de la tendencia. Un valor de p de 0.05 o mayor significa que no se puede rechazar una hipótesis nula (es decir, sin tendencias).

Departamento	Nombre de la estación	Precipitación		Temperatura	
		Valor de p	tau	Valor de p	tau
Cajamarca	CBA	0.03 (**)	110	<0.01 (***)	-158
	COC	0.40	101	0.75	-35
	CUT	<0.01 (***)	355	0.72	-43
	LLA	0.123	180	0.033 (**)	248
	CHU	<0.01 (***)	442	-	-
Lambayeque	CAY	0.11	386	<0.01 (***)	908
	JAY	0.06 (*)	231	0.58	67
	REQ	0.09	213	0.11	202
	EESP	0.05	228	0.024	262
<i>MEDIA-CAJAMARCA</i>		<i>0.029 (**)</i>	<i>253</i>	<i><0.01 (***)</i>	<i>308</i>
<i>MEDIA-LAMBAYEQUE</i>		<i>0.13</i>	<i>176</i>	<i>0.03</i>	<i>254</i>

5.1.4 Variaciones estacionales en las variables climáticas

La Figura 5.10 muestra que la mayoría de las estaciones indica una temporada de lluvias distintiva (desde enero hasta abril) seguido de un período seco (de mayo hasta agosto). Después de este período seco, algunas estaciones muestran un segundo período de lluvias (de setiembre a diciembre). Las estaciones de Lambayeque muestran una fuerte variación estacional en la temperatura, mientras que las diferencias estacionales son menos obvias para las estaciones de Cajamarca.

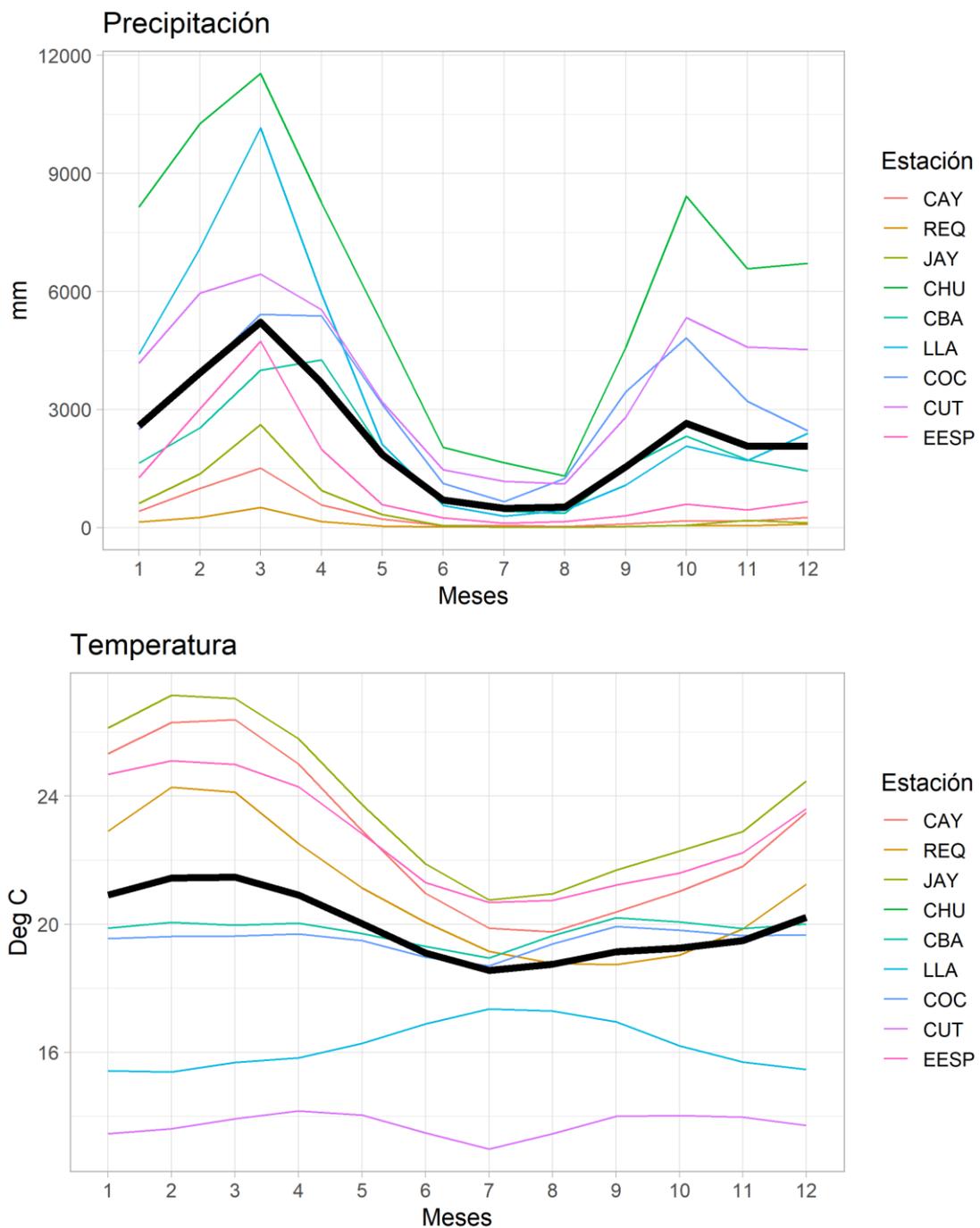


Figura 5.10 Promedio mensual a largo plazo de precipitación y temperatura para las nueve estaciones. Las líneas oscuras gruesas muestran las medias aritméticas a lo largo de todas las estaciones.

5.1.5 Variabilidad climática interanual

La variabilidad interanual en los regímenes climáticos locales puede representar un desafío para los sistemas de recursos hídricos de múltiples y complejas maneras. Por ejemplo, puede dar lugar a sequías persistentes que duran varios años, así como a inundaciones frecuentes con graves consecuencias ambientales y socioeconómicas (Kiem et al., 2003; Connel, 2017).

Por lo tanto, es especialmente importante entender los patrones de persistencia plurianual existentes en las variables climáticas al evaluar la resiliencia a largo plazo de los sistemas de recursos hídricos.

Antes de discutir la variabilidad climática interanual, se introduce aquí los conceptos de Temperatura Superficial del Mar (TSM), Índice de Oscilación del Sur (IOS) y ENSO. La Temperatura Superficial del Mar (TSM) es la temperatura del agua en la superficie del mar. La TSM no es uniforme en todo el mundo y siguen un patrón recurrente con fases de enfriamiento y calentamiento. El Sistema Integrado de Observación de los Océanos (IOOS®), dirigido por la NOAA, y el Centro de Aplicaciones e Investigación Satelitales (STAR) de la NOAA recopilan los datos de diversas fuentes para proporcionar valores de TSM en todo el mundo. Las desviaciones (mayores o menores) de la temperatura que exceden su rango natural de variación se denotan como una anomalía de TSM. Gilbert Walker (1904) notó que había zonas y patrones persistentes de altas y bajas presiones en todo el mundo. El patrón se distribuye de tal manera que la presión más alta en una zona ocurre simultáneamente con una presión más baja en alguna otra región. En un período de pocos años, el patrón oscila entre la zona de alta presión y la zona de baja presión.

Uno de estos patrones de oscilación está definido por el Índice de Oscilación del Sur (SOI). SOI es la diferencia estandarizada en la presión barométrica entre Darwin en Australia y la isla de Tahití del Pacífico Sur (Figura 5.11). Cuando el IOS es negativo, la presión atmosférica en Tahití es inferior a la normal, mientras que la presión en Darwin es superior a la normal.

ENSO indexes

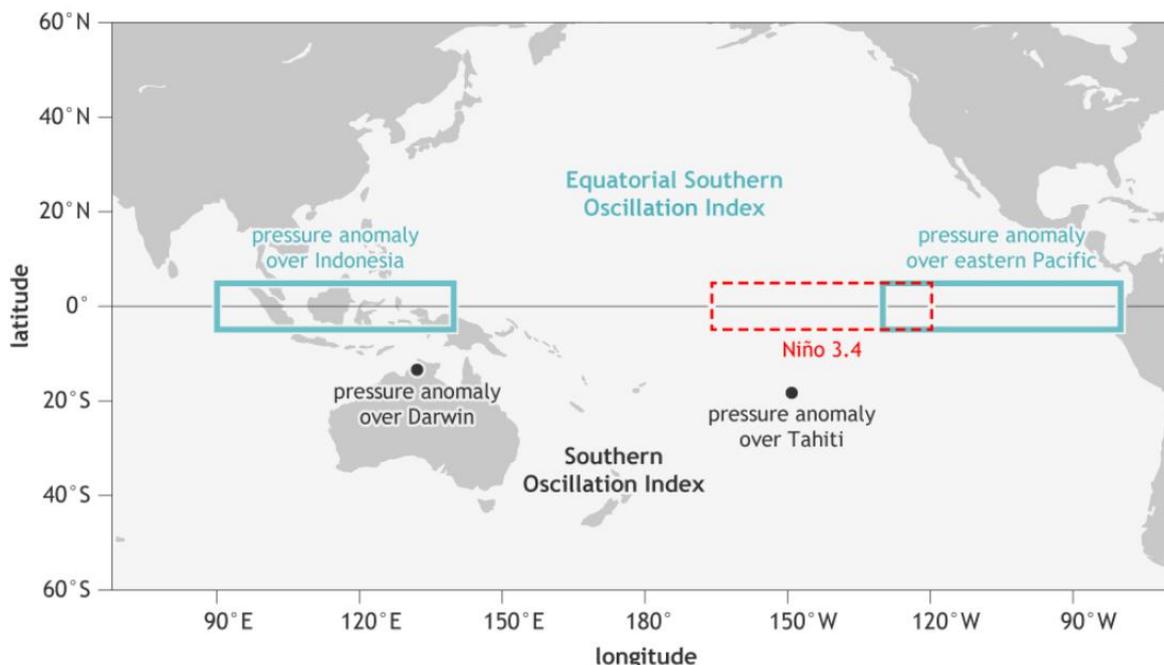


Figura 5.11 Ubicación de las estaciones utilizadas para el Índice de Oscilación del Sur (Tahití y Darwin, puntos negros), el Índice de Oscilación Ecuatorial del Sur (regiones del Pacífico ecuatorial oriental e Indonesia, delineadas en azul), y la región de El Niño 3.4 en el Océano Pacífico centro-oriental tropical para la temperatura de superficie del mar (línea punteada roja). Imagen de NOAA Climate.gov por Fiona Martin.

La serie de tiempo SOI suavizada corresponde a la temperatura de la superficie del mar a través del Pacífico oriental tropical. Un período continuo de IOS negativo coincide con aguas anormalmente cálidas a lo largo del Pacífico oriental tropical y se indica como una fase de El Niño. De manera similar, un período de IOS positivo continuo corresponde a agua oceánica anormalmente fría en el Pacífico oriental y se indica como una fase de La Niña. En la Figura 5.12, se presenta el índice multivariado de ENSO de 1980 a 2019. Podemos observar que la periodicidad en la oscilación es de entre 3-7 años.

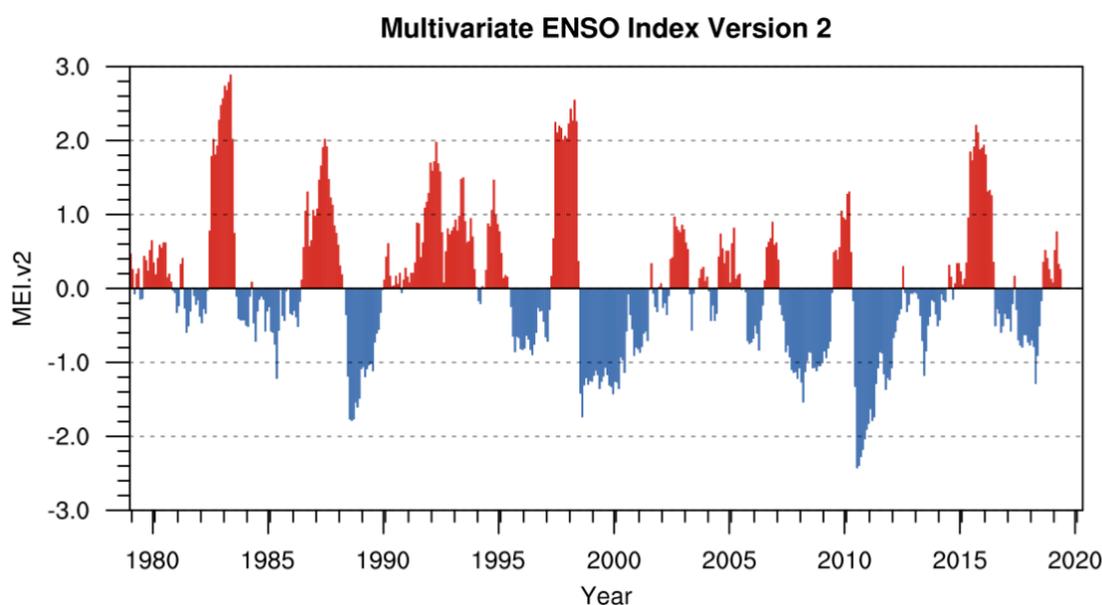


Figura 5.12 Índice de ENSO multivariado. El rojo indica la anomalía por encima de lo normal en la fase de El Niño, mientras que el azul indica la anomalía por debajo de lo normal en la fase de La Niña (Fuente: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>)

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en el Océano Pacífico tropical central y oriental. Se observa que las fases de El Niño y La Niña se producen en un patrón cíclico con un período de tres a siete años. El fenómeno de ENSO es importante porque afecta la circulación atmosférica global, que a su vez tiene una fuerte influencia interanual sobre la temperatura y la precipitación en todo el mundo. También nos enfocamos en el ENSO porque a menudo podemos predecir su llegada muchas temporadas antes de sus impactos más fuertes sobre el tiempo y el clima.

La Figura 5.13 presenta el impacto de ENSO sobre el clima en todo el mundo, promediado en el tiempo. Esta conexión del fenómeno de ENSO con el clima global se conoce como teleconexión. Se observa que, de diciembre a febrero, la fase El Niño corresponde a un clima húmedo y cálido, mientras que la Niña corresponde a un clima seco y fresco en el Perú. Sin embargo, el efecto de los fenómenos ENSO no es muy prominente de junio a agosto. Este informe se centra en los efectos del fenómeno ENSO en la región occidental y costera del Perú alrededor de la zona de estudio.

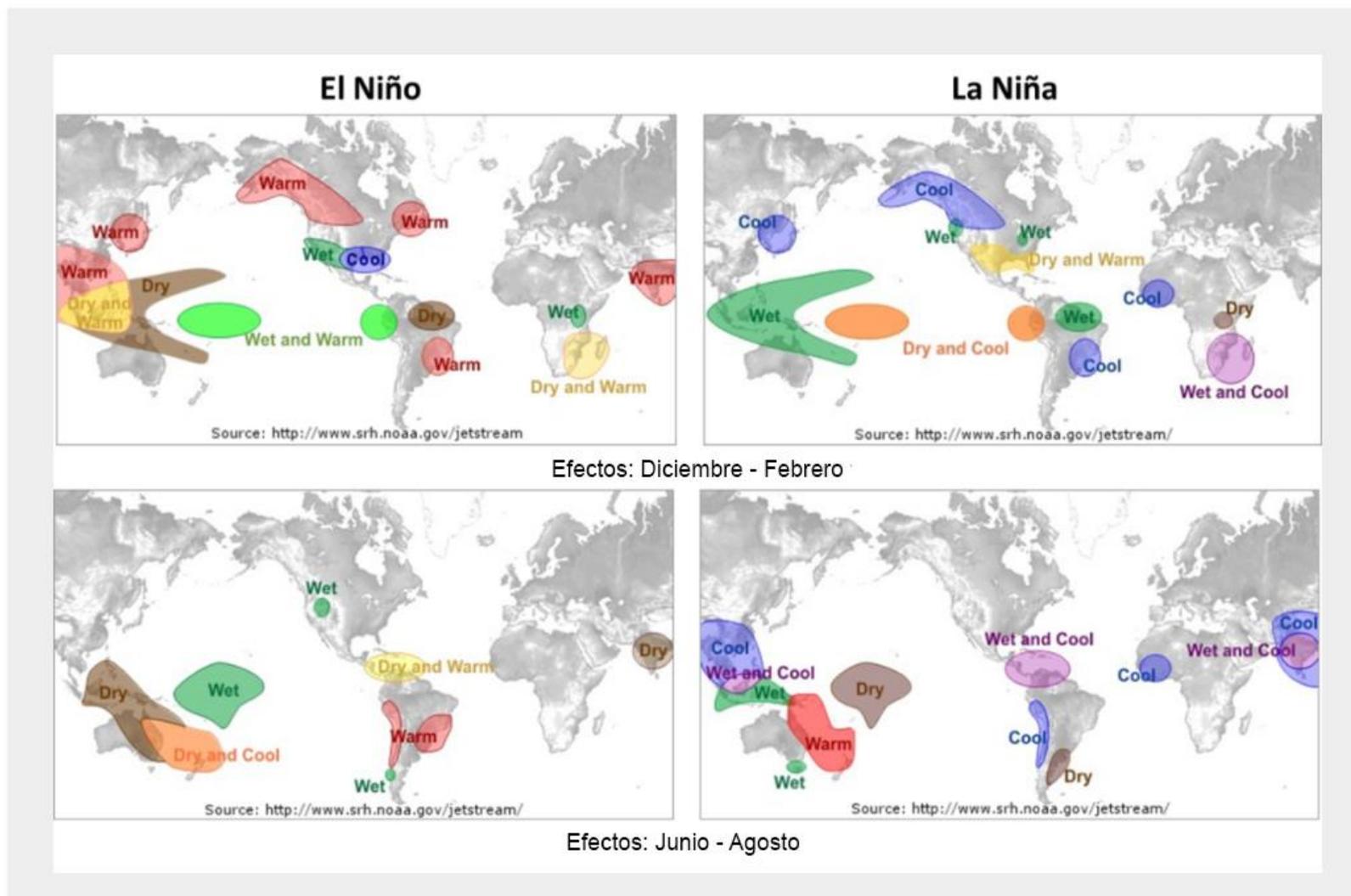


Figura 5.13 Efecto de las fases de El Niño y La Niña en la precipitación y temperatura global

(Fuente: <https://muchadoaboutclimate.wordpress.com/2013/10/14/enso-explained/>)

A escala interanual, la variabilidad de las precipitaciones es fuerte en las cuencas costeras del Perú y a menudo está relacionada con los eventos extremos de El Niño en el Océano Pacífico. Los datos históricos muestran que las cabeceras de las cuencas del sur están sufriendo más sequías, mientras que la costa peruana está recibiendo mayores precipitaciones debido al ENSO (Tapley y Waylen, 1990). Las anomalías de precipitaciones extremas observadas en la costa corresponden a los tres últimos eventos extremos de ENSO en los años 1972, 1982 y 1997 (Rau et al. 2017; Lavado et al. 2012). Rodríguez-Morata et al. (2018) sugirieron que el 21% de las precipitaciones extremas y los desastres hidromeoformicos en Perú han sido asociados con los eventos de El Niño y se observan principalmente en la costa norte del Pacífico peruano. Las condiciones locales tales como las circulaciones, la topografía o la Temperatura de la Superficie del Mar en la región cercana podrían ser otros factores que afectan las precipitaciones, además del fenómeno de ENSO (Kane 1999).

A pesar de los recientes avances en la ciencia del clima, todavía existen grandes incertidumbres sobre cómo el cambio climático puede afectar los patrones de ENSO. Cai et al. (2014) informaron que es probable que la frecuencia e intensidad de los eventos de ENSO aumenten en el futuro debido al cambio climático. Según sus estudios, se proyecta que el Pacífico ecuatorial oriental se calentará más rápido que las aguas oceánicas circundantes, lo que facilitará la ocurrencia de más convección atmosférica en la región ecuatorial oriental en el futuro. Es probable que el calentamiento más rápido del Pacífico ecuatorial oriental provoque un aumento de las precipitaciones en la costa peruana (Sulca et al. 2018).

5.1.6 Variabilidad de baja frecuencia de precipitación anual

En este estudio se evalúa la variabilidad de baja frecuencia en la precipitación anual para la región Chancay-Lambayeque por medio del método de análisis de ondículas (Steinschneider et al., 2013). Antes del análisis, tomamos el promedio aritmético de los registros anuales de precipitaciones dentro de las estaciones de Lambayeque y Cajamarca para evaluar la periodicidad por separado para estas dos regiones.

La Figura 5.14 muestra los resultados del análisis de ondículas en la región de Lambayeque (a) y la región de Cajamarca (b), respectivamente. Se detectó una señal fuerte (>90% significativa) en la región de Lambayeque a los 16-18 años, y una señal más débil (<90% significativa) a los 5-7 años. De manera similar, para Cajamarca, encontramos dos señales fuertes (>90% significativas) a 5-7 y 12-13 años, respectivamente. En ambas regiones, la periodicidad multianual de 5 a 7 años puede asociarse con el fenómeno ENSO.

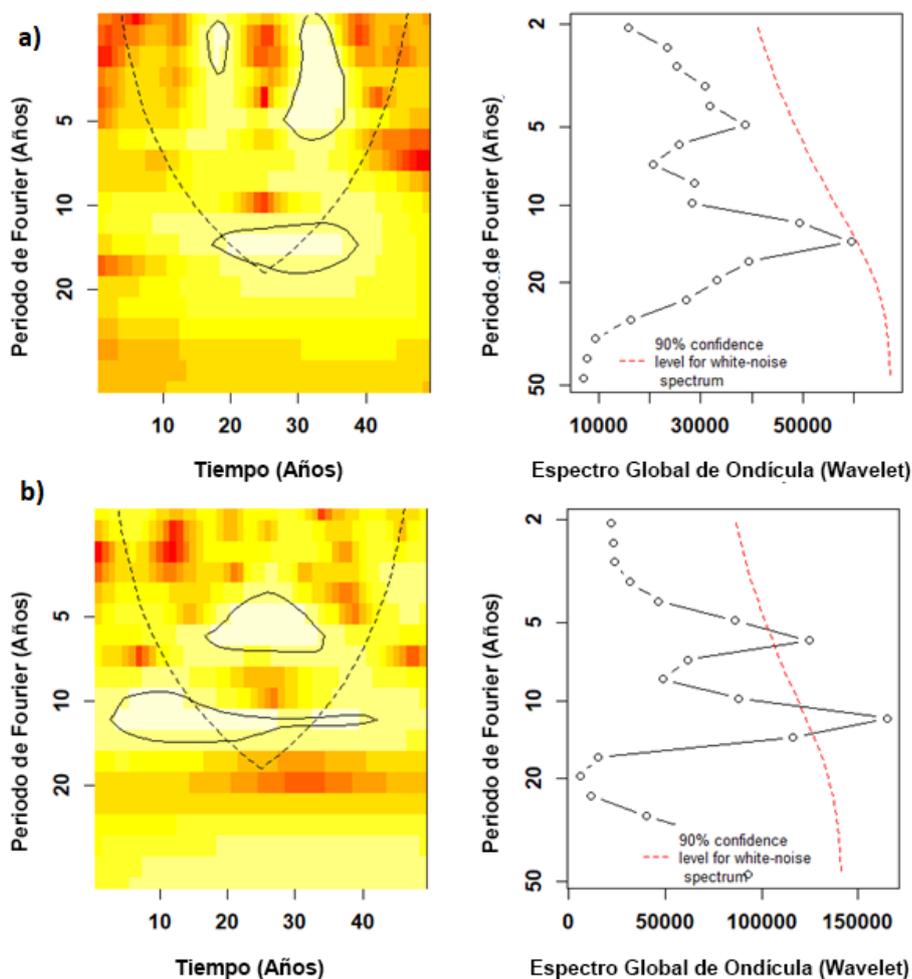


Figura 5.14 Espectro de ondículas para la precipitación anual en los departamentos de Lambayeque (a) y Cajamarca (b)

Se exploró la influencia de la temperatura de la superficie del mar y la presión del nivel del mar en la precipitación del área del proyecto por medio de un análisis de correlación. Se obtuvieron la temperatura superficial mensual del mar (Reynolds et al. 2002), la presión mensual sobre el nivel del mar (Kalnay et al. 1996) y la precipitación media por área en el lugar del proyecto (Weedon et al. 2014). Cada año se dividió en dos estaciones, la estación húmeda comprendida entre los meses de diciembre y mayo (DJFMAM), y la estación seca entre junio y noviembre (JJASON). Se tomó el valor promedio de SST y SLP cada temporada para cada año, y se graficó en relación con la precipitación media por área registrada durante el mismo tiempo.

La correlación entre la precipitación total y el valor promedio de TSM o SLP se calculó a un nivel significativo de $\alpha = 0,5$ (Figura 5.15a/b). Se observa que la precipitación de la estación húmeda tiene una buena correlación con la TSM mientras que la precipitación de la estación seca no está muy correlacionada con la TSM. Esto indica que la precipitación en la costa del Perú durante la temporada de lluvias se correlaciona con la temperatura superficial del mar cerca de la costa (indicada en rojo en la Figura 5.15a). En la Figura 5.15c/d se observa una cierta correlación entre las series temporales de precipitaciones y la presión a nivel del mar tanto en la estación seca como en la húmeda; sin embargo, la región de correlación significativa es diferente.

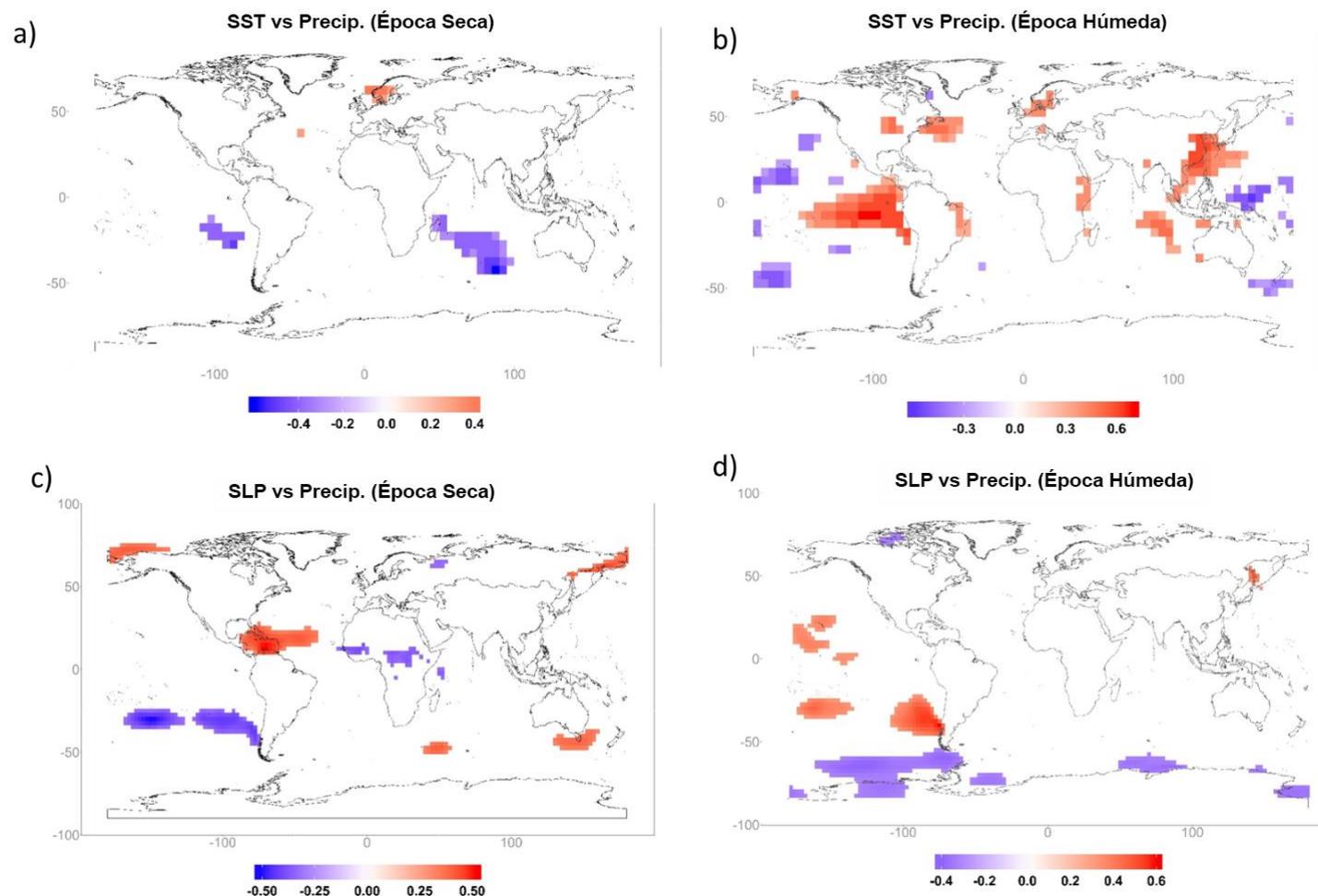


Figura 5.15 Mapas de correlación de la precipitación media del área frente a los campos climáticos. Las parcelas a y c son para la precipitación de la estación seca, es decir, de junio a noviembre; b y d son para la precipitación de la estación húmeda, es decir, de diciembre a mayo. Las parcelas a y b corresponden a la Temperatura Superficial del Mar (SST, por sus siglas en inglés); c y d corresponden a la Presión a Nivel del Mar (SLP, por sus siglas en inglés). La barra de color representa los valores de correlación significativos en alfa = 0,5, rojo indica una correlación positiva mientras que el azul indica una correlación negativa, no se muestra una correlación insignificante.

5.2 Proyecciones del modelo climático

Las proyecciones climáticas para Chancay-Lambayeque se evaluaron utilizando el conjunto de datos de la fase 5 del Proyecto de Inter-Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5 en sus siglas en inglés) (Taylor et al. 2012). El conjunto CMIP5 utilizado para el análisis tiene un total de 47 Modelos de Circulación General (*GCM* por sus siglas en inglés), y consiste en un total de 165 corridas de los modelos con las Trayectorias de Concentración Representativas (*RCPs*) 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 del IPCC³.

Las proyecciones evaluadas en esta sección están enfocadas en los cambios relativos para los períodos de 2020-2050 (centrado en el año 2035) y 2035-2065 (centrado en el año 2050) con respecto al período histórico de 1978-2008.

Las Figura 5.16 y Figura 5.17 muestran los cambios climáticos proyectados para los dos períodos analizados. Para la ventana temporal 2020-2035, las temperaturas medias anuales se proyectaron con un incremento de hasta 3°C con relación al valor promedio histórico. En el mismo período, los cambios de la precipitación anual oscilan entre el -30% y el 10% respecto del promedio histórico. Para el período 2035-2065, las temperaturas medias anuales se proyectaron con un incremento de hasta 4.5 °C, mientras que los cambios proyectados en la precipitación varían desde el -45% hasta el 10%.

³ Las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) utilizadas para las proyecciones climáticas hacen referencia a cuatro rutas diferentes de emisiones de GEI y concentraciones atmosféricas, emisiones de contaminantes del aire y uso de la tierra en el siglo XX (Fuente: <https://www.ipcc.ch/>)

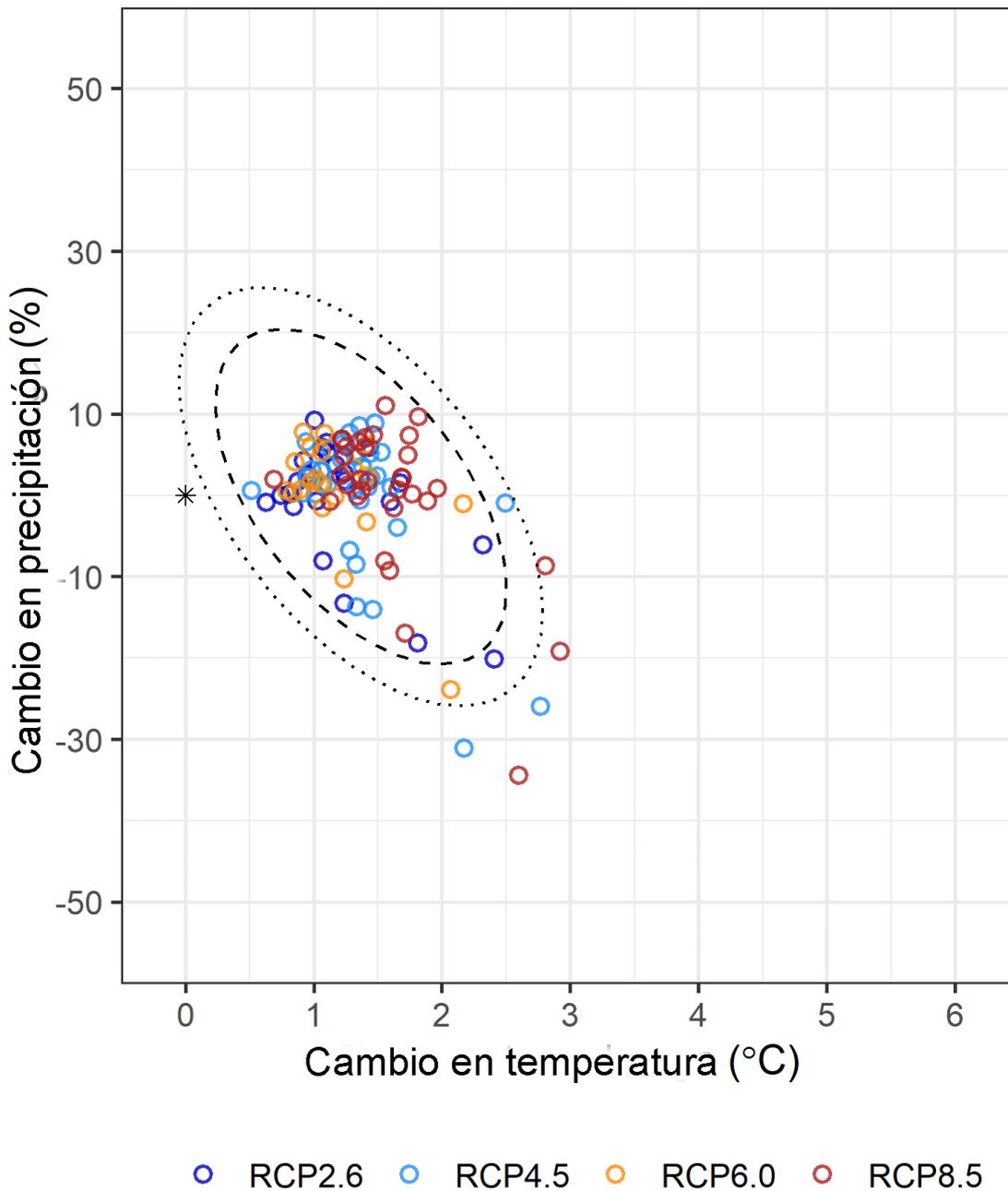


Figura 5.16 Cambios proyectados en la temperatura media y la precipitación de los modelos climáticos utilizados para el CMIP5 para el año 2035. El esquema de colores indica los cuatro Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) fijadas por el IPCC en el informe AR5.. Las líneas discontinuas y punteadas muestran la función de densidad de probabilidad normal bivariado ajustada a las proyecciones climáticas en intervalos de confianza del 95% y 99%, respectivamente.

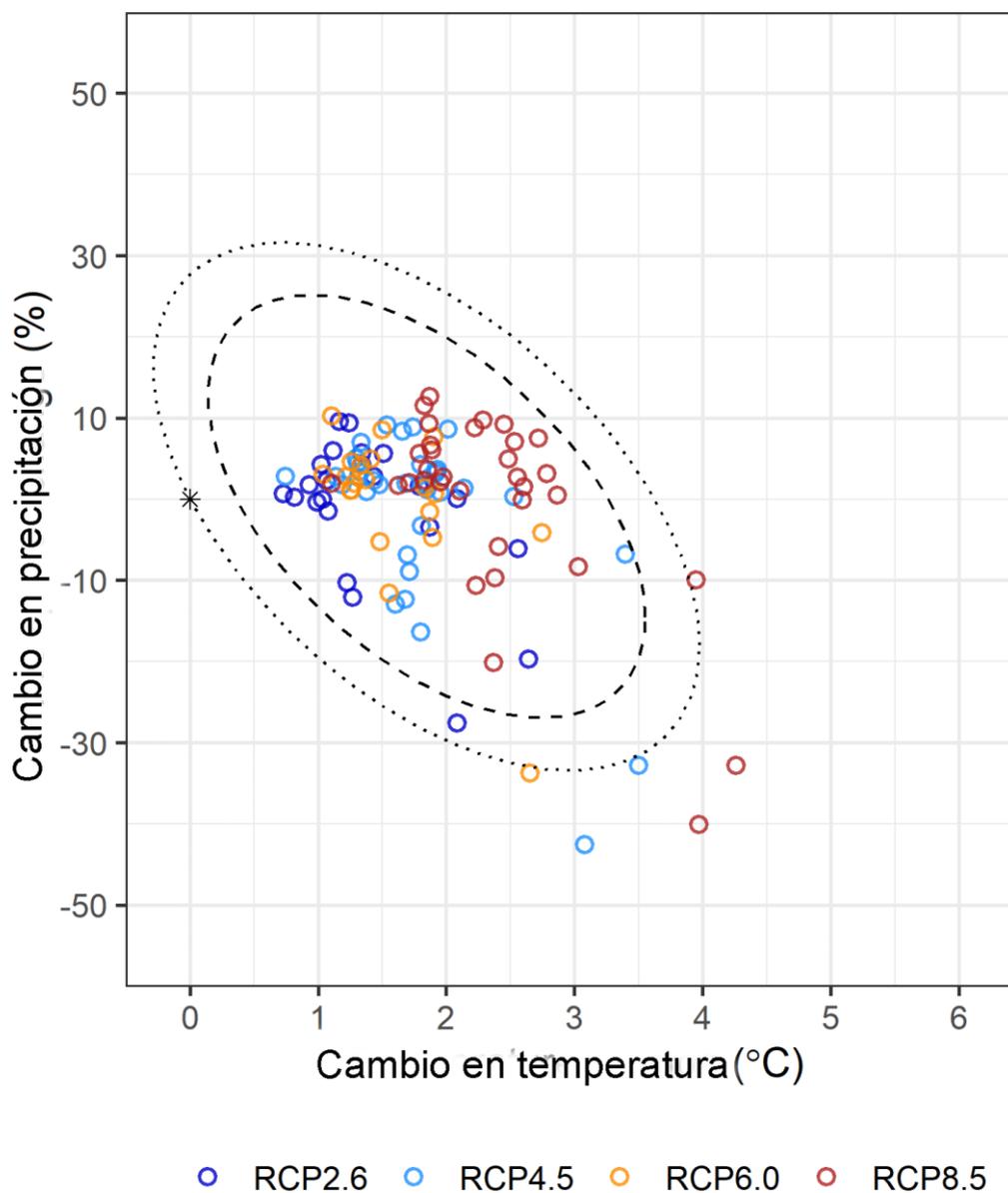


Figura 5.17 Cambios proyectados en la temperatura media y la precipitación de los modelos climáticos utilizados para el CMIP5 para el año 2050. El esquema de colores indica los cuatro Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) fijadas por el IPCC en el informe AR5. Las líneas discontinuas y punteadas muestran la función de densidad de probabilidad normal bivariado ajustada a las proyecciones climáticas en intervalos de confianza del 95% y 99%, respectivamente.

Además de los cambios proyectados en la media climática, también evaluamos cómo varía la proporcionalidad de precipitación sobre los meses de la temporada de lluvias (enero a abril) y los meses restantes. La Figura 5.18 muestra los cambios proyectados en precipitación durante la temporada de lluvias. Encontramos rangos inciertos similares para ambos períodos 2020-2035 y 2035-2065, indicando un cambio relativo en la precipitación de la temporada de lluvias de aproximadamente -15% a 20%.

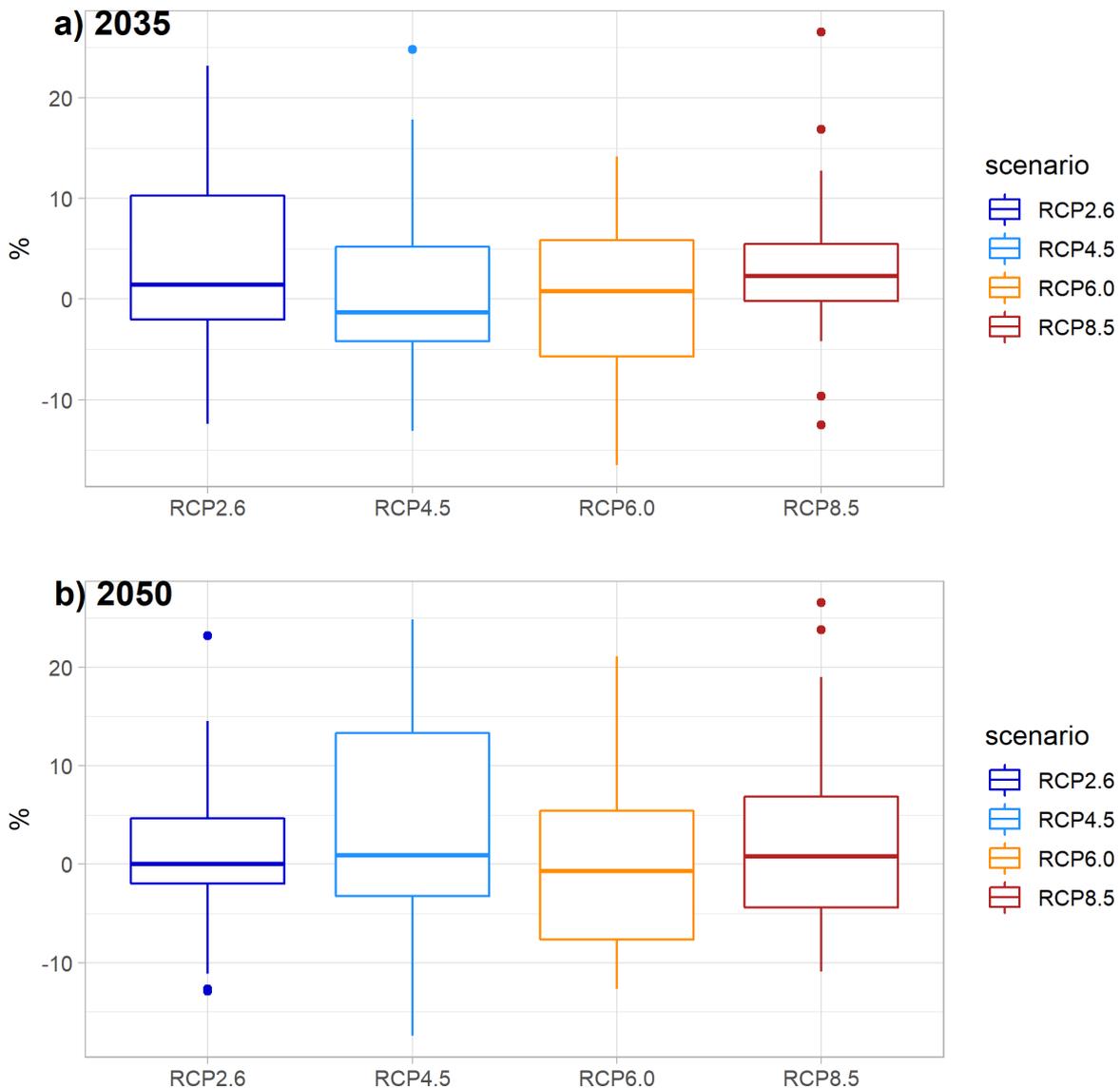


Figura 5.18 Cambios proyectados en la cantidad relativa de precipitación en la temporada lluvias (enero a abril) según los modelos climáticos del CMIP5. El esquema de colores indica los cuatro Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) fijadas por el IPCC en el informe AR5. Figura

5.3 Análisis de caudales extremos

Los datos de caudal para la cuenca Chancay-Lambayeque están disponibles sólo en la estación Racarumi ubicada en 6°37'32.80" S y 79°18'19.94" W (Figura 5.19). La estación Racarumi se ubica en la parte no regulada de la cuenca, río arriba de la presa Tinajones. La estación hidrométrica proporciona datos diarios del caudal para un período de 35 años desde enero de 1970 hasta diciembre de 2014 (Figura 5.20).

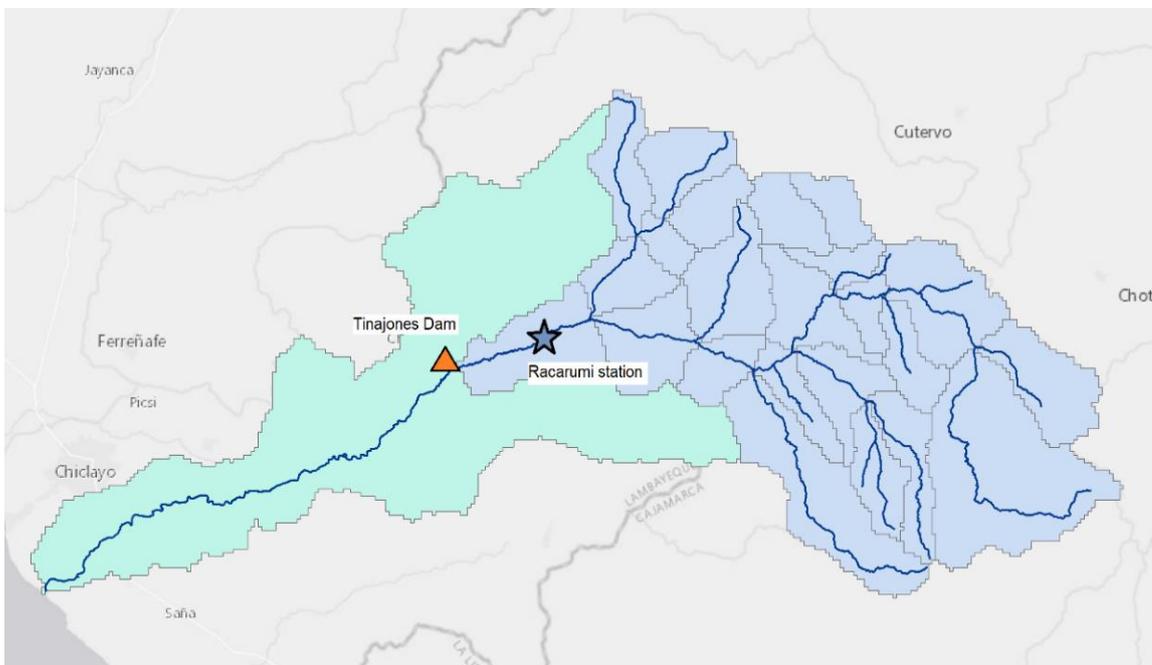


Figura 5.19 Ubicación de la estación de aforos de Racarumi dentro de la cuenca Chancay-Lambayeque

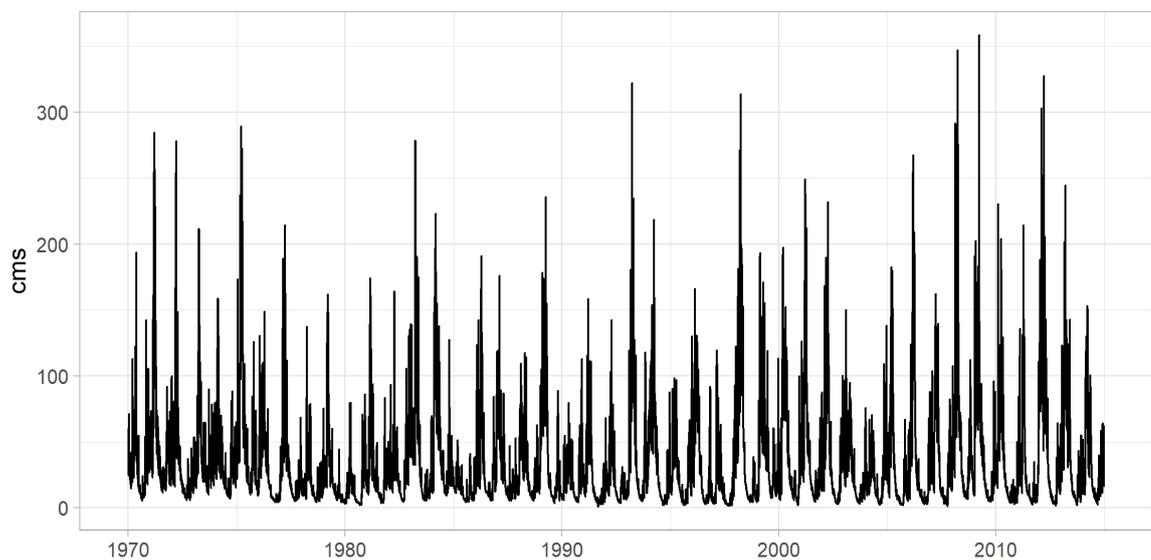


Figura 5.20 Datos de caudal diario en la estación de aforos de Racarumi el periodo comprendido entre enero de 1970 y diciembre de 2014.

La Figura 5.21. muestra la precipitación anual total en la estación Racarumi sobre el período de observación histórica de 35 años. El flujo anual muestra una alta variabilidad y varía desde 15 a 55 m³/s dentro del período de observación. La media móvil de caudal en ventana de diez años (línea azul en la Figura 5.21.) muestra un período de sequía hidrológica que abarca la década de los 80 para posteriormente observarse un incremento continuado del caudal promedio interanual.

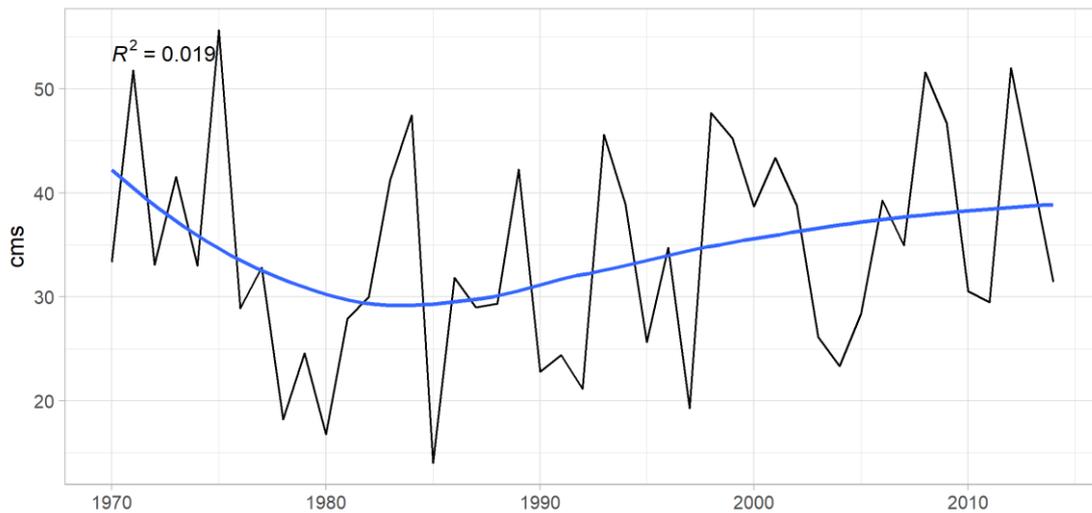


Figura 5.21. Flujo anual histórico en la estación Racarumi para el período 1970-2014. La línea azul es el promedio móvil del flujo anual a una ventana de 10 años.

La Figura 5.22 muestra los cambios en la estacionalidad del flujo histórico en la estación Racarumi sobre el mismo periodo de análisis. Los resultados marcan claramente la diferencia entre la temporada de caudal alto (enero-mayo) y la temporada de caudal bajo (julio-setiembre). En general se observa una tendencia negativa del caudal mensual durante el periodo de estiaje, entre los meses de julio y septiembre. Si bien es necesario un análisis más profundo y mayores datos para comprender las razones de esta disminución en los caudales bajos, se puede pensar que está asociado a la reducción del flujo de base debido al aumento de las extracciones de agua superficial y subterránea aguas arriba de la estación de aforos.

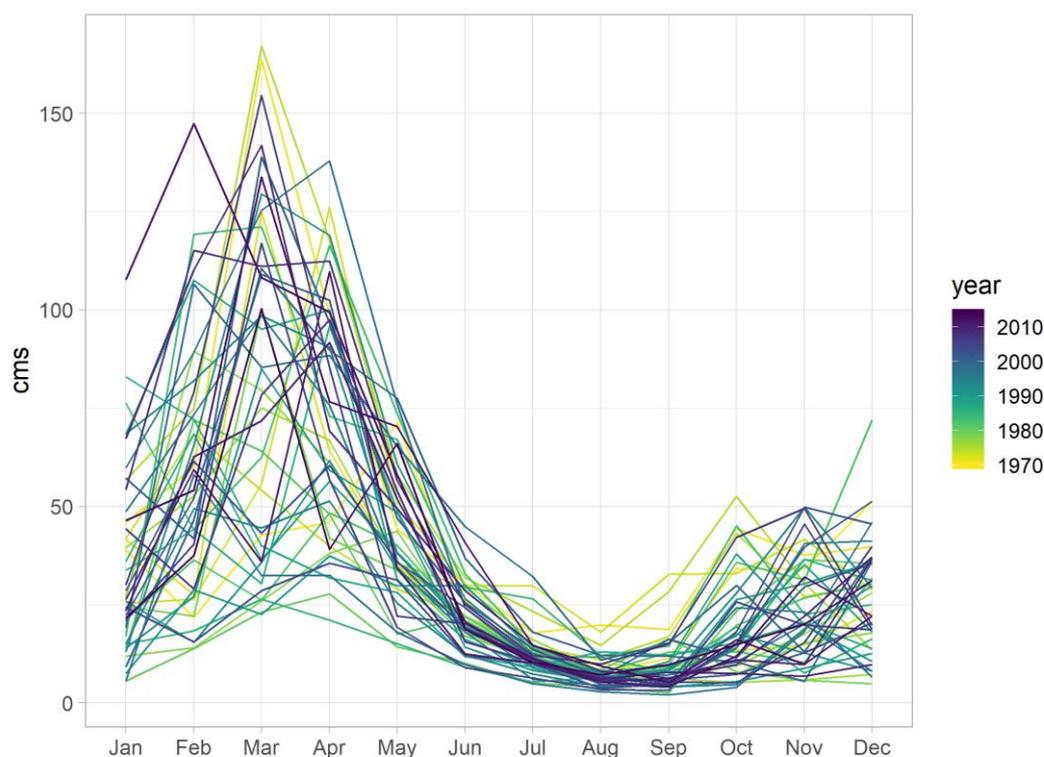


Figura 5.22. Flujo mensual histórico en la estación Racarumi para el período 1970-2014. La línea de color cambia de amarillo a azul oscuro basado en el año calendario como se indica en la leyenda.

5.4 Síntesis

Analizamos los registros meteorológicos y de caudal históricos y las proyecciones de modelos climáticos para la cuenca de Chancay-Lambayeque con el objetivo de tener una aproximación inicial al funcionamiento de la cuenca, de las incertidumbres climáticas y de la calidad de los datos disponibles para el análisis de DTF. En una primera fase se han evaluado los datos de precipitación y temperatura disponibles en términos de cobertura y calidad, correlaciones espaciales, variabilidad estacional (dentro del año) e interanual (multianual), y tendencias a largo plazo. En segundo lugar, se han analizado las proyecciones climáticas proporcionadas por los Modelos Globales de Circulación para la región de Chancay-Lambayeque para comprender los cambios proyectados a largo plazo para las variables de temperatura y precipitación. En una última fase se evaluó la variabilidad y las tendencias en los datos de caudal diario disponibles en la estación de aforos de Racarumi. Se concluye:

Respecto del análisis de los datos meteorológicos:

- Los datos meteorológicos disponibles provienen de nueve estaciones Cayalti (CAY), Reque (REQ), Jayanca (JAY), Chugur (CHU), Cbanos (CBA), Llama (LLA), Cochhabamba (COC), Cutervo (CUT) y El Espinal. (EESP) en su mayoría localizados en la zona oriental de la cuenca y en la región de Cajamarca.
- Los datos disponibles varían sustancialmente en función del periodo. El más largo corresponde a setenta y cinco años (1937-2013), y el más corto a 25 años (1987-2013). También hay discontinuidades debido a la falta de registros.

- Los datos meteorológicos guardan una buena correlación espacial, en especial en las regiones de Lambayeque y Cajamarca. Los coeficientes de correlación para la precipitación diaria oscilan entre 0.07 y 0.42, y para la precipitación media mensual entre 0.2 y 0.89. Las correlaciones de la temperatura diaria son bastante elevadas (>0.9) dentro de las estaciones en las regiones de Cajamarca y Lambayeque.
- Los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas indican una temporada de lluvias bastante marcada (de enero a abril), seguida de un período de estiaje (de mayo a agosto) para casi todas las estaciones. Las estaciones de Lambayeque muestran una fuerte variación estacional en la temperatura.
- En general, la precipitación media anual de las mismas nueve estaciones muestra una tendencia positiva (creciente). Sin embargo, no se observa una tendencia clara para la temperatura media anual.
- La precipitación media anual y las variables de temperatura en la cuenca muestran una periodicidad multianual (variabilidad de baja frecuencia), que se correlaciona con los ciclos del fenómeno ENSO de 5-7 años. La periodicidad multianual de la precipitación anual analizada a través de un análisis de ondas muestra una fuerte señal (significancia superior al 90%) en la región de Lambayeque a los 16-18 años, y una señal más débil (no estadísticamente significativa) a los 5-7 años. Un patrón similar se ha observado en el departamento de Cajamarca, encontrándose dos señales fuertes ($>90\%$ de significancia) a los 5-7 y 12-13 años respectivamente.

En cuanto al análisis de las proyecciones climáticas:

- Las proyecciones climáticas para el área de estudio se evalúan utilizando los resultados de proyecto CMIP5 utilizado en el último informe del IPCC (AR5), considerando 165 corridas de modelos climáticos y tomando en consideración las cuatro Trayectorias de Concentración Representativas (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5). Para la aplicación del DTF en la cuenca se ha considerado las ventanas temporales de proyección de 2020-2035 y 2035-2065.
- Para el período de 2020-2035, se proyecta aumentos en la temperatura media anual de hasta 3 °C en relación respecto del promedio histórico. En el mismo período, los cambios en la precipitación anual oscilan entre el -30% y el 10% en relación con el promedio histórico.
- Para el período 2035-2065, se proyecta aumentos de la temperatura media anual de hasta 4.5°C, mientras que los cambios de precipitación proyectados varían de -45% a 10%.

Con respecto al análisis de los datos del caudal diario en la estación de aforos de Racarumi:

- La estación de aforos de Racarumi ofrece registros de caudal para un período de 35 años, desde enero de 1970 hasta diciembre de 2014.
- El caudal promedio anual en la estación Racarumi muestra una alta variabilidad interanual oscilando entre los 15 y los 55 m³/s en período de observación. Los caudales anuales disminuyeron durante los años 80 y 90, y han aumentado consistentemente desde entonces.
- Los flujos históricos indican una alta variabilidad estacional, con una temporada de elevados caudales (enero-mayo) y una temporada de estiaje (julio-septiembre). También se ha detectado una tendencia de reducción del caudal de estiaje después de la década del 2000.

6 Fase II: Análisis Inicial

En la segunda fase, exploramos la magnitud de los impactos ocasionados por las incertidumbres climáticas y no climáticas, previamente especificadas, a través de un análisis de evaluación rápida. Si se encuentra y considera que los impactos son importantes, procederemos a la Fase III (Prueba de Estrés Climático) para hacer un análisis detallado de la resiliencia y la robustez del sistema frente las incertidumbres más relevantes.

El ejercicio de evaluación rápida se presenta en dos partes: 1) un análisis rápido del riesgo de suministro de agua, y 2) un análisis del riesgo de inundación. El primer análisis se realizó utilizando el modelo de simulación WEAP existente para la cuenca (versión Plan PGRH, ver anexo A3) y su forzamiento con datos de caudal estimados a partir de datos meteorológicos históricos mediante la rutina de precipitación-escorrentía de WEAP. Para el análisis de inundaciones, se desarrolló un modelo de regresión simple que relaciona el caudal máximo anual y la precipitación acumulada en el periodo inmediatamente precedente al registro de caudal.

6.1 Análisis inicial del riesgo de suministro de agua

El estudio comienza analizando la sensibilidad de la confiabilidad y la vulnerabilidad frente a los factores climáticos y no climáticos especificados. A continuación, se calcula la elasticidad de cada indicador cuantificando el cambio proporcional obtenido en el desempeño debido a los cambios realizados en cada factor. En el paso 3, estimamos los rangos de desempeño plausibles para los indicadores de confiabilidad utilizando las elasticidades del paso 2 y la mejor información disponible sobre los factores de incertidumbre. Los resultados de los análisis se utilizan para hacer un juicio sobre qué factores deben evaluarse durante la Prueba de Estrés Climático (Fase III del DTF).

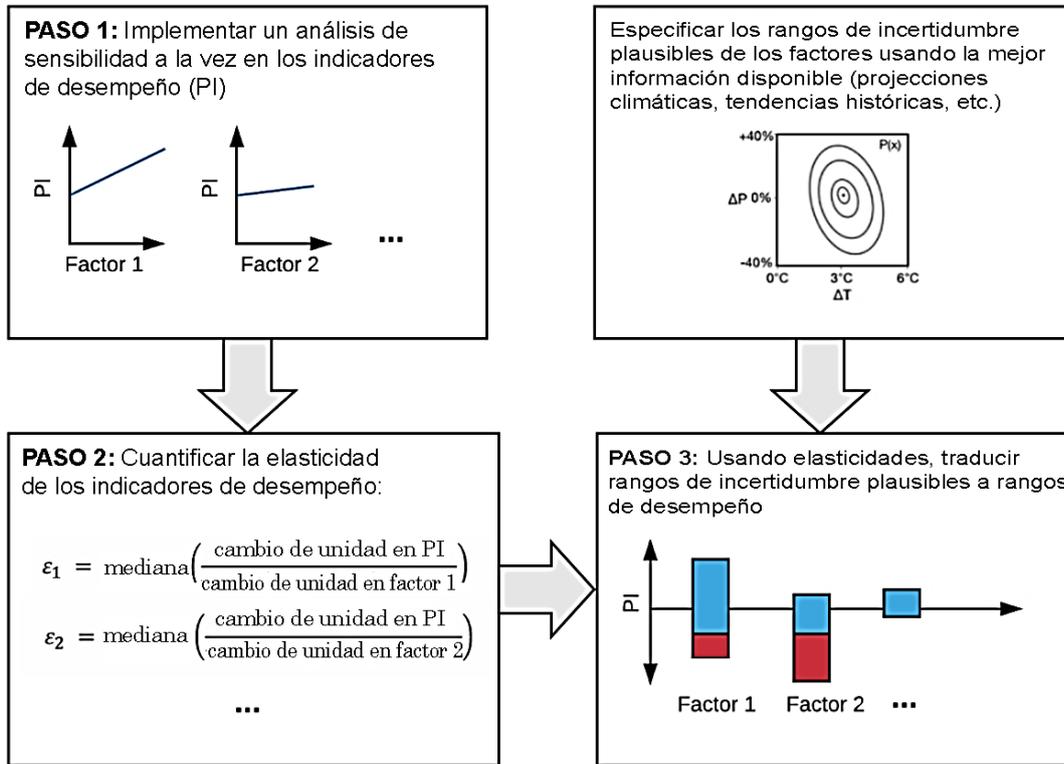


Figura 6.1. El diagrama de flujo para el ejercicio de evaluación rápida de cuatro pasos

6.1.1 Análisis de sensibilidad de factores de incertidumbre

Realizamos un análisis de sensibilidad local sobre los indicadores de desempeño utilizando la aplicación del modelo WEAP existente (WEAP-Plan) y considerando un período de simulación de 40 años desde 1970 a 2010.

En el Cuadro 6.1 se listan los parámetros y rangos de incertidumbre utilizados para el análisis de sensibilidad.

Cuadro 6.1 Parámetros climáticos y no climáticos considerados en el análisis de sensibilidad

Factores de incertidumbre	Definición	Rango de análisis de sensibilidad
TEMP-PROM	Cambios en la temperatura anual relativa a la media histórica (1970-2010), en °C	0 a 5°C
PREC-PROM	Cambios en la precipitación anual relativa a la media histórica (mes/año)	-50 a 50%
PREC-EHUM	Cambios en la proporción promedio de precipitación en la temporada húmeda (%)	-30% a 40%
DEM-POBL	Cambios en la demanda doméstica mensual (%)	0% a 50%
DEM-RIEGO	Cambios en la demanda de riego mensual (%)	0% a 50%
ACUM-SEDIM	Cambios en la tasa de acumulación de sedimentos (%)	0 a 2 MCM/año
TRASVASE-MES	Cambios en la tasa de transferencia mensual intercuenca al Río Chancay	-50 a 50%

Los factores TEMP-PROM y PREC-PROM exploran los efectos de posibles cambios en las condiciones climáticas promedio. Estas variables se modifican de manera uniforme en el tiempo y espacio, usando los mismos factores de cambio en todos los pasos de tiempo y en cada subcuenca. El parámetro PREC-EHUM explora los efectos de posibles cambios en la proporción de precipitación que ocurren en los meses de temporada húmeda (enero, febrero y marzo). En este caso se procede cambiando gradualmente la precipitación de la temporada húmeda de -30% a +40%, mientras la media general de precipitación anual se mantiene igual. DEM-POBL e DEM-RIEGO exploran los efectos del cambio en la demanda del agua asumiendo que todos los cambios ocurren de forma uniforme a lo largo de toda la cuenca.

ACUM-SEDIM investiga los efectos de las reducciones graduales en la capacidad del reservorio Tinajones debido a la acumulación de sedimentos. Finalmente, el parámetro TRASVASE-MES evalúa la sensibilidad del desempeño a cambios en la cantidad de agua trasvasada desde los ríos Chotano y Conchano hacia la cuenca Chancay-Lambayeque.

La Figura 6.2 muestra la sensibilidad de la confiabilidad del suministro de agua poblacional para los siete parámetros especificados. La confiabilidad es insensible para todos los parámetros analizados excepto, y como es previsible, para la demanda poblacional. Sin embargo, la magnitud de la sensibilidad es relativamente pequeña: un aumento del 40% en la demanda resulta en una pequeña disminución en la confiabilidad del 2% (del 100% al 98%).

La Figura 6.3 muestra que la vulnerabilidad del suministro de agua poblacional en términos de déficit promedio es de solo 0.1 MCM/mes bajo un incremento de 40% en la demanda poblacional.

Estos resultados no extraños del todo ya que el modelo WEAP asigna una mayor prioridad de uso de agua a las unidades de demanda poblacional frente a las de riego u otras actividades. Además, vale la pena señalar que la demanda doméstica total es solo una pequeña fracción de la demanda de irrigación total (aproximadamente 5%), lo que la hace más fácil de satisfacer en primer lugar.

La Figura 6.4 muestra la sensibilidad de la confiabilidad de la irrigación para los mismos siete parámetros. La confiabilidad de la irrigación es altamente sensible a PREC-PROM comparada con todos los demás parámetros. Una disminución del 25% en la precipitación media anual resulta en una disminución en el rendimiento de 76% a aproximadamente 40%. En cambio, un cambio de 2 grados en la temperatura media produce una disminución del rendimiento de 76% a aproximadamente 72%. De acuerdo con la Figura 6.4 , DEM-RIEGO es el segundo parámetro más importante seguido por TEMP-PROM, TRASVASE-MES, PREC-EHUM, ACUM-SEDIM, y DEM-POBL respectivamente.

La Figura 6.5 muestra resultados similares para las sensibilidades de la vulnerabilidad del suministro de irrigación, ya que PREC-PROM y DEM-IRRIG parecen ser los factores más importantes.

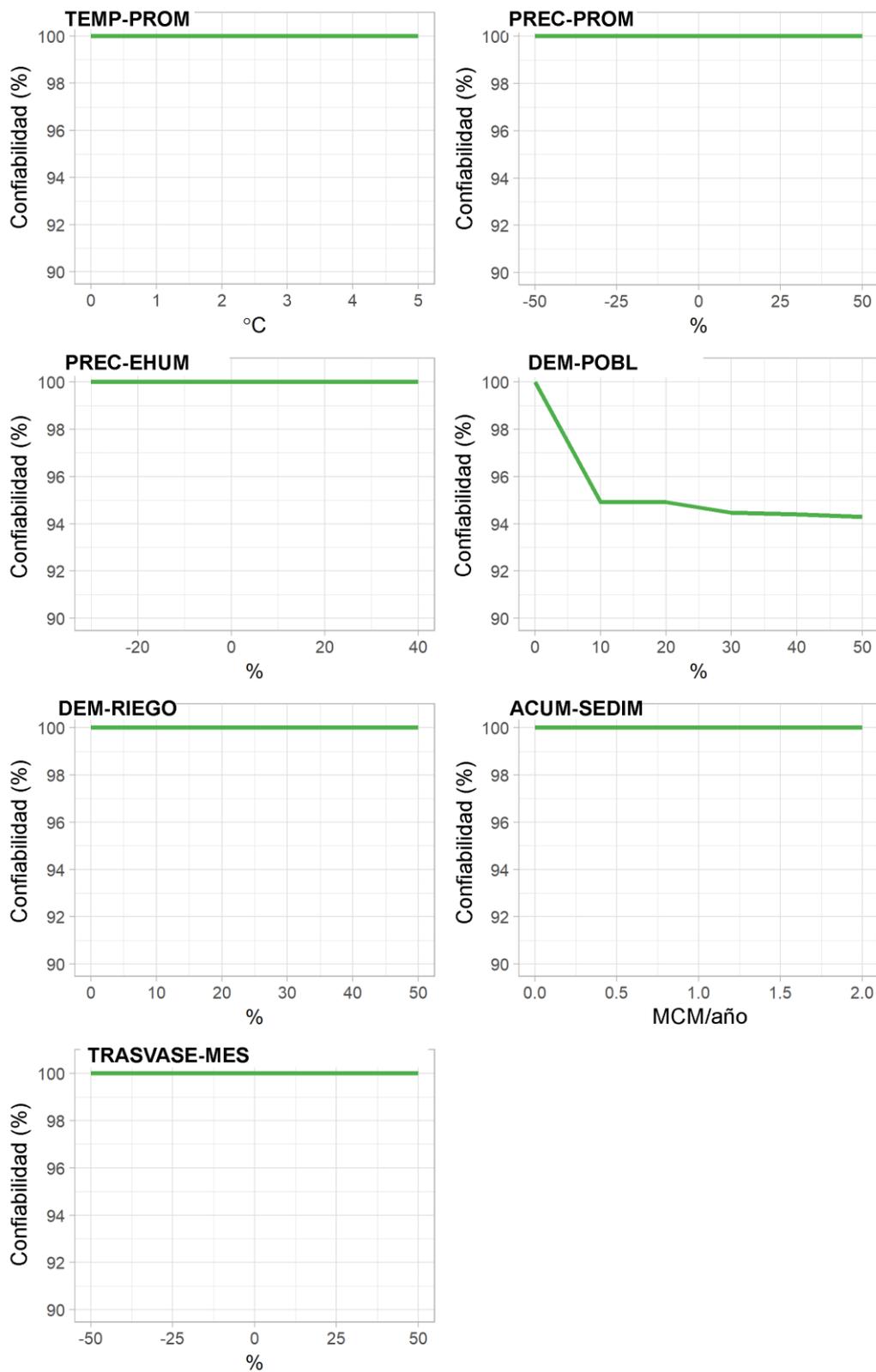


Figura 6.2 Sensibilidad para el índice de confiabilidad en el suministro de agua poblacional para los siete factores de incertidumbre evaluados.

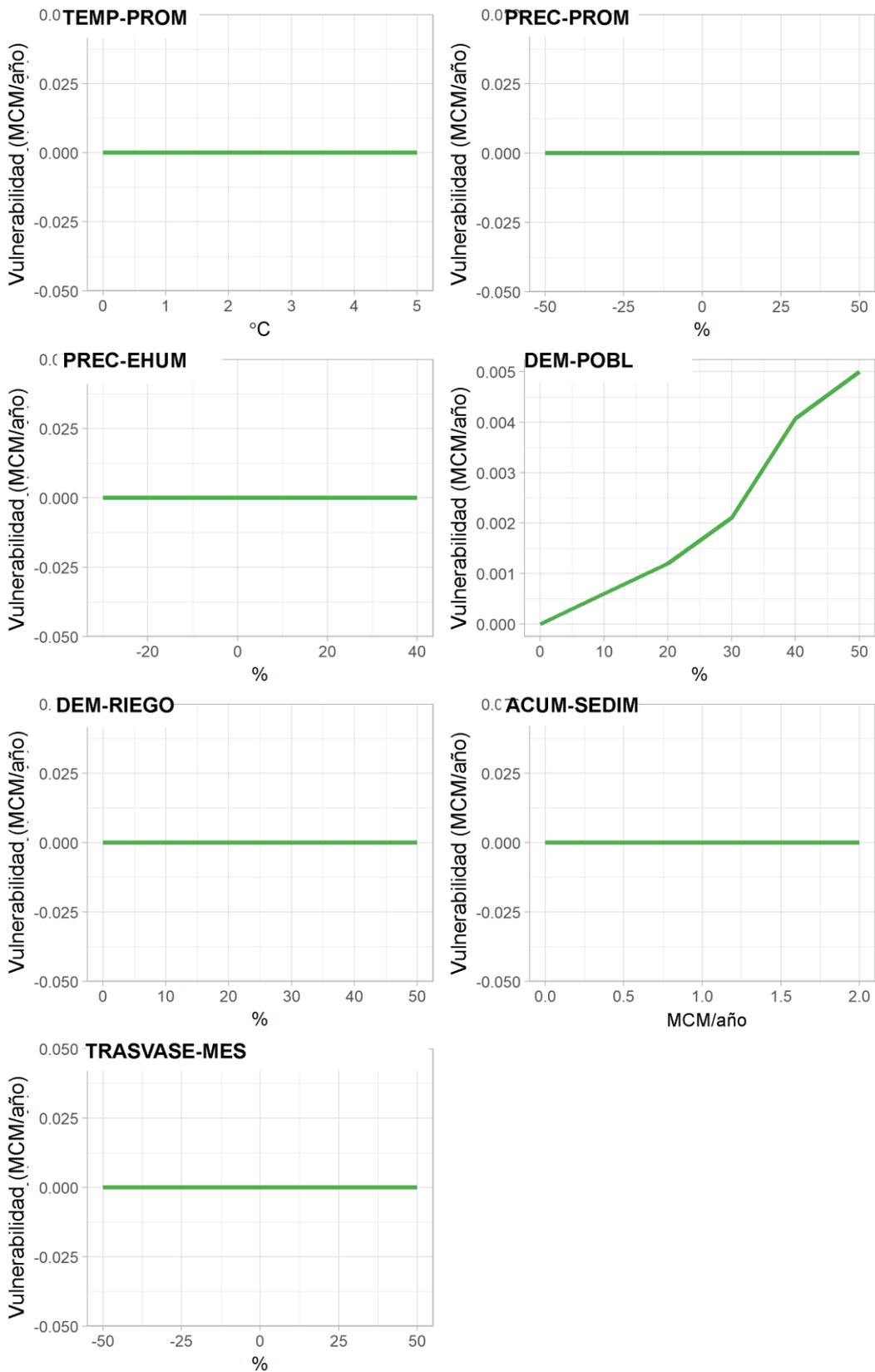


Figura 6.3 Sensibilidad del indicador de vulnerabilidad del suministro de agua poblacional para los siete factores de incertidumbre evaluados.

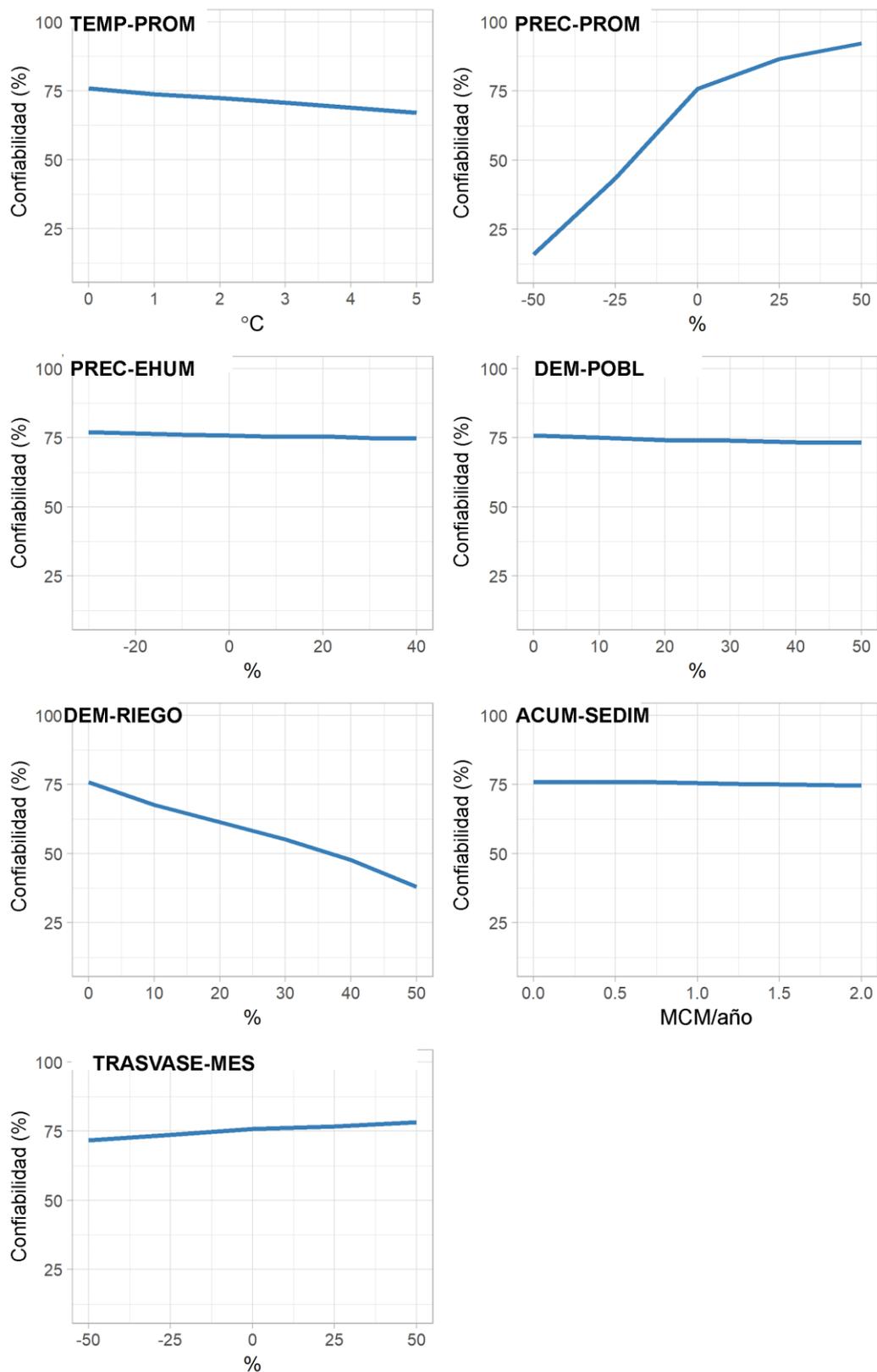


Figura 6.4 Sensibilidad del indicador de confiabilidad del suministro de agua de riego para los siete factores de incertidumbre evaluados.

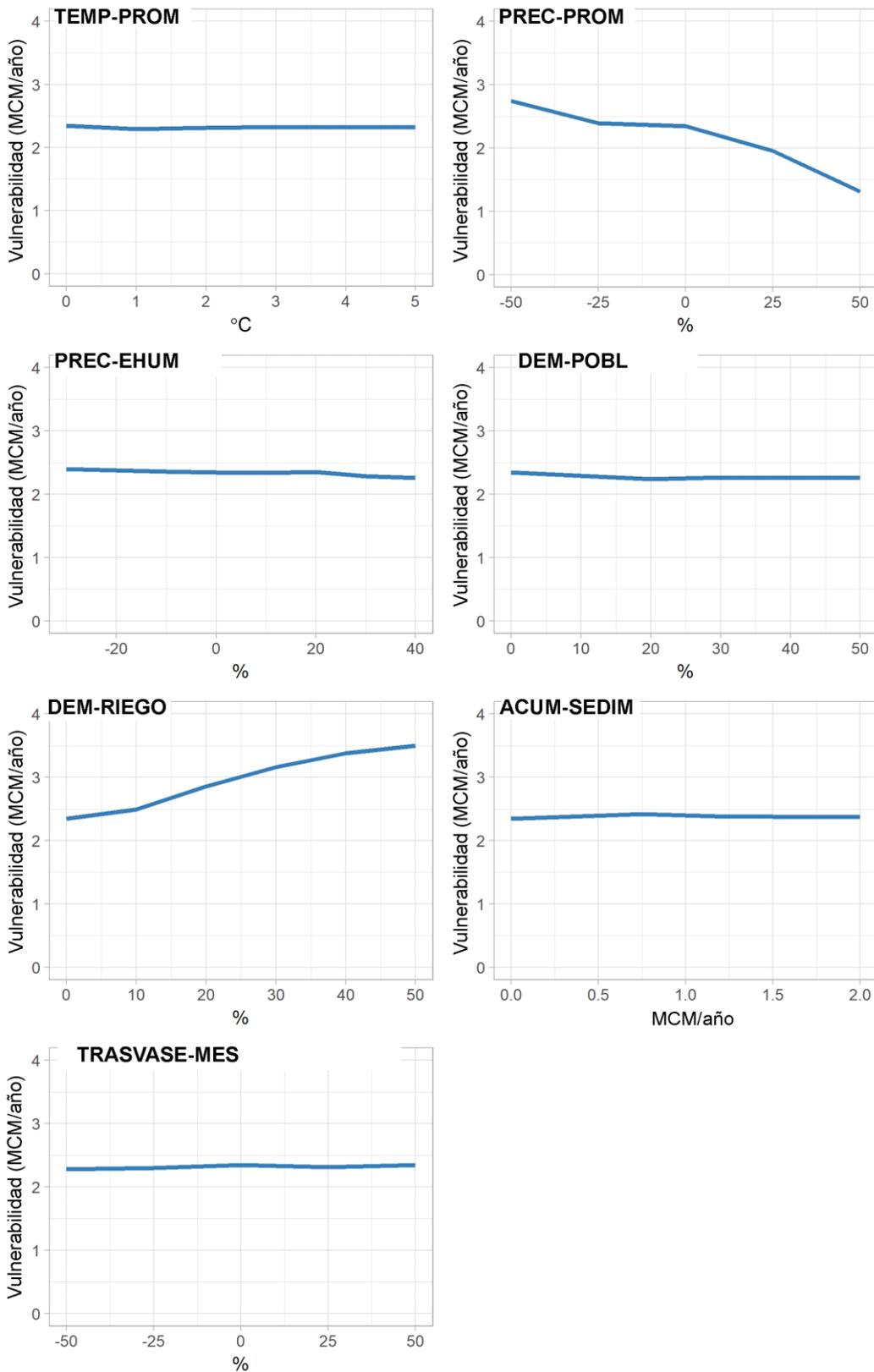


Figura 6.5 Sensibilidad del indicador de vulnerabilidad del suministro de agua de riego para los siete factores de incertidumbre evaluados.

6.1.2 Elasticidades de la confiabilidad de satisfacción de la demanda

En este paso, se traduce los resultados del análisis de sensibilidad a elasticidades. Utilizamos la elasticidad como una aproximación lineal de la tasa del cambio relativo en el indicador de desempeño en función de los cambios relativos en un factor de incertidumbre. Para dar cuenta de las no linealidades en las tasas de cambio, tomamos los valores promedio. Para todos los valores, excepto para TEMP-PROM, la elasticidad es calculada según:

$$\varepsilon_i = \text{media} \left(\frac{\text{Cambio relativo en el rendimiento (\%)}}{\text{Cambio relativo en el factor } i \text{ (\%)}} \right)$$

Donde, ε_i es un valor sin nominación unitaria que expresa la elasticidad del indicador de desempeño para el factor i . Para TEMP-PROM, cuantificamos la elasticidad ε_T como el cambio porcentual del rendimiento con respecto a los grados de aumento de temperatura (Vano et al., 2012):

$$\varepsilon_T = \text{media} \left(\frac{\text{Cambio relativo en el rendimiento (\%)}}{\text{aumento de temperatura en } ^\circ\text{C}} \right)$$

El Cuadro 6.1 muestra las elasticidades calculadas para los indicadores de confiabilidad para abastecimiento poblacional y de riego. La confiabilidad para satisfacer la demanda poblacional se muestra inelástica para todos los parámetros excepto, como es previsible, para DEM-POBL. Sin embargo, la magnitud del valor de elasticidad es bajo (-0.01). Respecto de la confiabilidad para abastecer la demanda de riego, las elasticidades más altas se han mostrado para TEMP-PROM (-1.81), seguido de PREC-PROM (0.76), DEM-RIEGO (-0.74) y ACUM-SEDIM (-0.66).

Cuadro 6.1 Elasticidades calculadas para las métricas de confiabilidad de suministro doméstico y de irrigación

Factor de incertidumbre	Elasticidades de la confiabilidad de satisfacción de la demanda poblacional	Elasticidades de la confiabilidad de satisfacción de la demanda de riego
TEMP-PROM	0	-1.81
PREC-PROM	0	0.76
PREC-EHUM	0	-0.04
DEM-POBL	-0.01	-0.05
DEM-RIEGO	0	-0.74
ACUM-SEDIM	0	-0.66
TRASVASE-MES	0	0.07

6.1.3 Rangos de rendimiento plausibles para los indicadores de desempeño

En el paso final, se estima el rango de desempeño plausible en base a los valores de elasticidad calculados anteriormente y los rangos de incertidumbre plausibles para cada uno de los factores especificados. En este caso, se definen los rangos de incertidumbre plausibles utilizando la mejor información disponible, incluyendo las tendencias históricas, modelos de proyección o simplemente la opinión de expertos.

En el Cuadro 6.2 se resumen los rangos de incertidumbre plausibles especificados para cada factor para el año 2050. Para los factores climáticos (TEMP-PROM, PREC-PROM, PREC-EHUM), se establecen los rangos de incertidumbre plausibles en base a las proyecciones climáticas reportadas por el CMIP5 (es decir, 95% de intervalos de confianza en los datos). Para la demanda de agua poblacional, se asume una tasa de crecimiento poblacional desde 0.5% al 1% que resulta en un incremento de la población, y a su vez, un incremento en la demanda del 20 al 45% (se descarta cualquier cambio en la tasa de demanda per habitante). Para la demanda de irrigación, se asume un rango de incertidumbre de 15% alrededor del estimado de incremento especificado de 30% en el modelo WEAP. Para la tasa de acumulación de sedimentos, se emplea un rango plausible desde 0.5 a 1.5 MMC/año basado en la evaluación de los datos de acumulación histórica de sedimentos en el reservorio Tinajones. Finalmente, para el parámetro TRASVASE-MES se asume cambios de más-menos 25% respecto de la línea de base del volumen trasvasado desde los ríos Chotano y Conchano.

*Cuadro 6.2 Rangos de incertidumbre plausibles especificados para los parámetros (Los rangos de parámetros son los mismos que en la Cuadro 6.1) *La gama se define según la sentencia del analista*

Factor de incertidumbre	Rango de sensibilidad	Rango plausible	Notas
TEMP-PROM (°C)	[0, 5]	[0, 4]	99% de nivel de confianza de la mejor distribución normal multivariable para la variación climática proyectada para el horizonte 2050 por los modelos GCM del proyecto CMIP5
PREC-PROM (%)	[-50, 50]	[-35, 32]	
PREC-EHUM (%)	[-30, 40]	[-15%, 30]	
DEM-POBL (%)	[0, 50]	[20, 45]	Opinión de experto basada en una reciente tendencia de crecimiento poblacional en Perú (para el año 2050)
DEM-RIEGO (%)	[0, 50]	[15, 45]	Opinión de experto basada en un análisis existente de simulación en WEAP (horizonte 2050)
ACUM-SEDIM (MMC/año)	[0, 2]	[0.5, 1.5]	Opinión de experto basada en las observaciones históricas de acumulación de sedimentos (horizonte 2050)
TRASVASE-MES (%)	[-50, 50]	[-25, 25]	Opinión de experto

La Figura 6.6 presenta los rangos de desempeño para la confiabilidad del suministro poblacional y de riego. Este rango es bastante estrecho para el caso de la demanda poblacional, y el 95% del objetivo de la confiabilidad se cumple bajo estas condiciones. Esto es un hallazgo esperado dado que la demanda poblacional se muestra previamente como inelástica para casi todos los parámetros evaluados. Los resultados son más interesantes para la confiabilidad para satisfacer la demanda de riego observándose rangos plausibles de desempeño entre 40-70% para DEM-RIEGO, 50-100% para MEAN-PRECIP, 68-75% para TEMP-PROM, y 75-78% para TRASVASE-MES. Estos resultados sugieren que, a excepción de escenarios climáticos muy húmedos, la confiabilidad para satisfacer la demanda de riego está siempre por debajo del umbral de desempeño del 80% especificado por los actores locales.

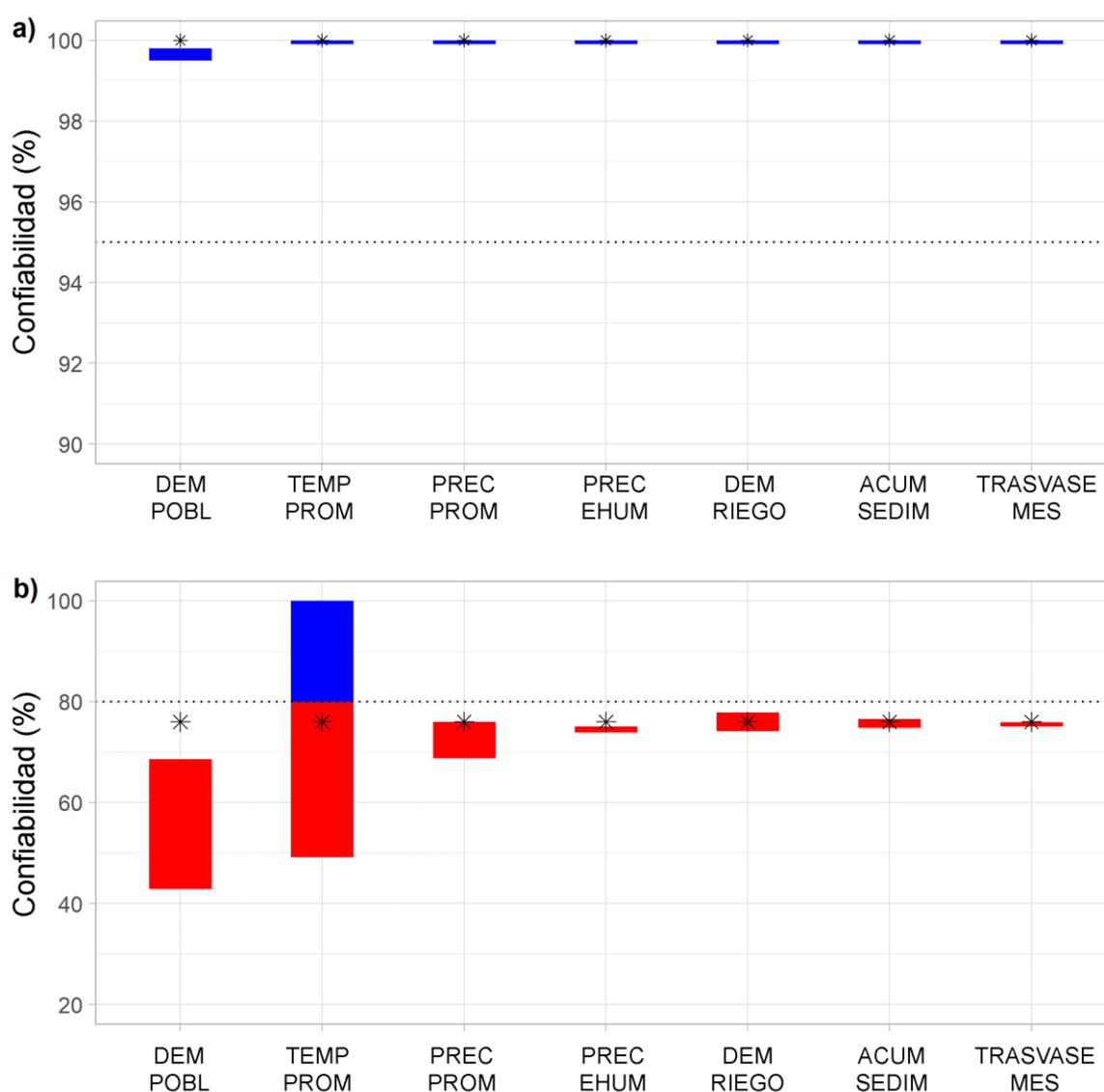


Figura 6.6 Rangos de desempeño plausible para la confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua poblacional (a, panel superior) y de riego (b, panel inferior). La línea horizontal punteada muestra el umbral de desempeño satisfactorio. El símbolo de estrella indica los valores de desempeño bajo ejecuciones de simulación histórica (línea base).

6.2 Análisis de sensibilidad de las reglas de asignación

En esta sección, se evalúa la sensibilidad del desempeño en función de los cambios en las reglas de asignación de agua en el modelo WEAP. Para ello, se han definido tres esquemas alternativos de priorización:

- *Prioridad Poblacional*: La máxima prioridad en el suministro recae en los nodos de demanda poblacional, seguido de los nodos de riego, y por último los nodos de demanda industrial y minera.
- *Prioridad de Riego*: La máxima prioridad en el suministro recae en los nodos de demanda de riego, seguido de los nodos de demanda poblacional, y por último los nodos de demanda industrial y minera.
- *Prioridad Equitativa*: Todos los nodos de demanda en el sistema de recursos hídricos tienen la misma prioridad de satisfacción de la demanda.

La Figura 6.7 compara la confiabilidad del suministro doméstico y de riego bajo las reglas de priorización considerando tres posibles escenarios climáticos: normal (condiciones históricas), seco (reducción de la precipitación media en un 60%) y húmedo (aumento de la precipitación media en un 40%).

En condiciones normales, la confiabilidad del suministro poblacional cae de aproximadamente del 100% al 71% bajo la adopción de la alternativa de priorización del riego. La diferencia en el desempeño es relativamente menor en condiciones con clima húmedo (del 100% al 81%) y más severa en condiciones secas (del 83% al 24%). En contraste, encontramos que la confiabilidad del suministro de riego muestra un ligero aumento cuando la demanda de riego se prioriza respecto del resto de usos, esto es del 74% al 77%, del 83% al 86% y del 30% al 32% en condiciones de clima húmedo, normal y seco, respectivamente.

Estos resultados indican que la confiabilidad del suministro poblacional es altamente sensible a la regla de prioridad seleccionada, mientras que la confiabilidad del riego es relativamente insensible. Se concluye que no existe una razón de peso para cambiar la regla de prioridad existente en el actual modelo WEAP, que prioriza la satisfacción de la demanda de agua poblacional frente al resto de usos.

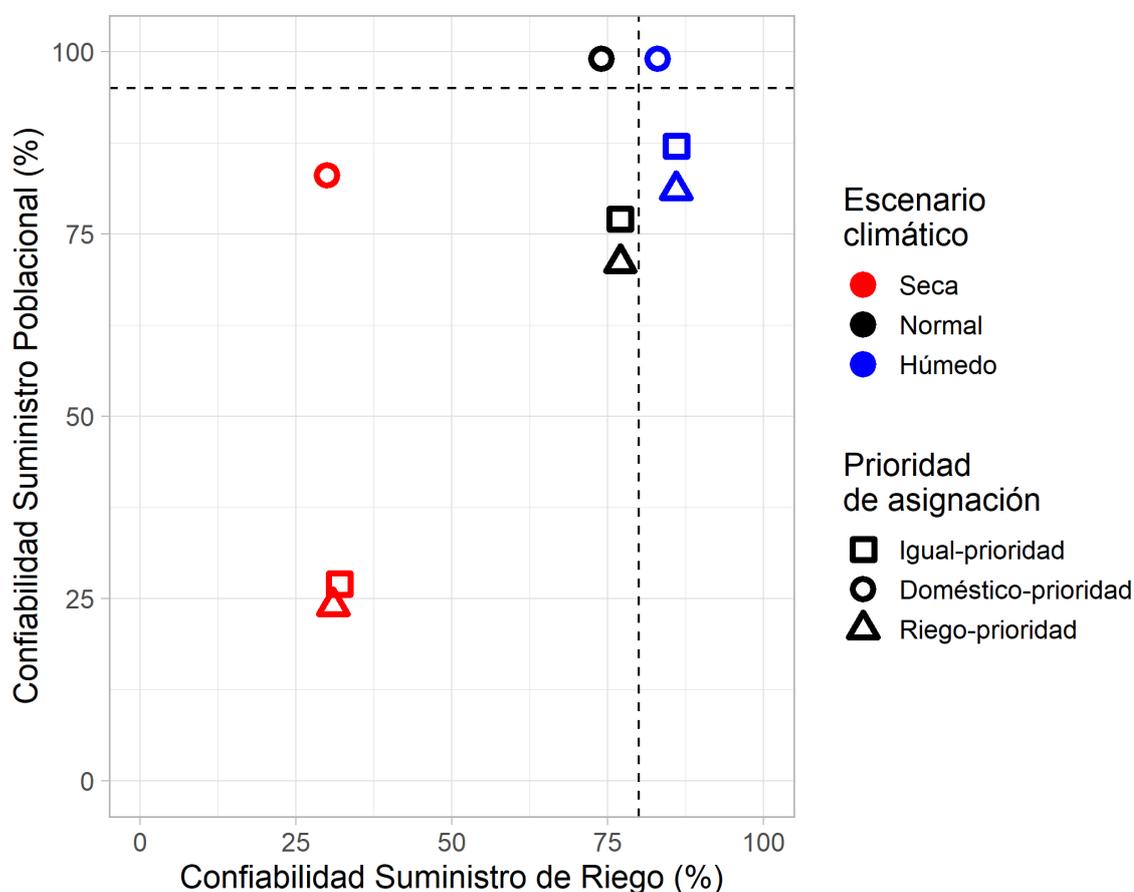


Figura 6.7 Valores del indicador de confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua poblacional y de riego bajo diferentes prioridades de asignación de agua. Los colores negro, rojo y azul muestran el desempeño en condiciones normales, secas y húmedas. Las líneas discontinuas muestran el umbral de confiabilidad de satisfacción de la demanda del 95% (doméstico) y del 80% (riego).

6.3 Análisis inicial del riesgo de inundación

Se evalúa el riesgo de inundación a través de un análisis simple de los valores extremos de caudal y un análisis de sensibilidad de los cambios de precipitación media. Para el análisis de extremos se utilizan registros históricos de precipitación y caudal, mientras que para el análisis de sensibilidad sólo se consideran los cambios en el régimen de precipitación media anual ya que los efectos de los demás factores de incertidumbre climática mostraron tener un impacto insignificante en el riesgo de inundación.

El análisis incluye tres pasos:

- Análisis del periodo de retorno de caudales extremos a partir de registros históricos en la estación de Racarumi.
- Análisis de la relación entre caudales extremos en Racarumi y la precipitación acumulada en la cuenca,
- Análisis de sensibilidad de caudales extremos a cambios en el patrón de precipitación media anual.

6.3.1 Análisis de valores extremos de caudal en la estación Racarumi

En la Figura 6.8 se representa gráficamente la serie de caudal promedio diario registrado en la estación de Racarumi y de lluvia en la estación de Chugur en el período 1963-2009 (43 años). A fin de realizar un análisis de la frecuencia de caudales extremos, se obtienen los caudales máximo anuales registrado en el periodo de estudio lo que resulta en una serie de 46 datos de caudal.

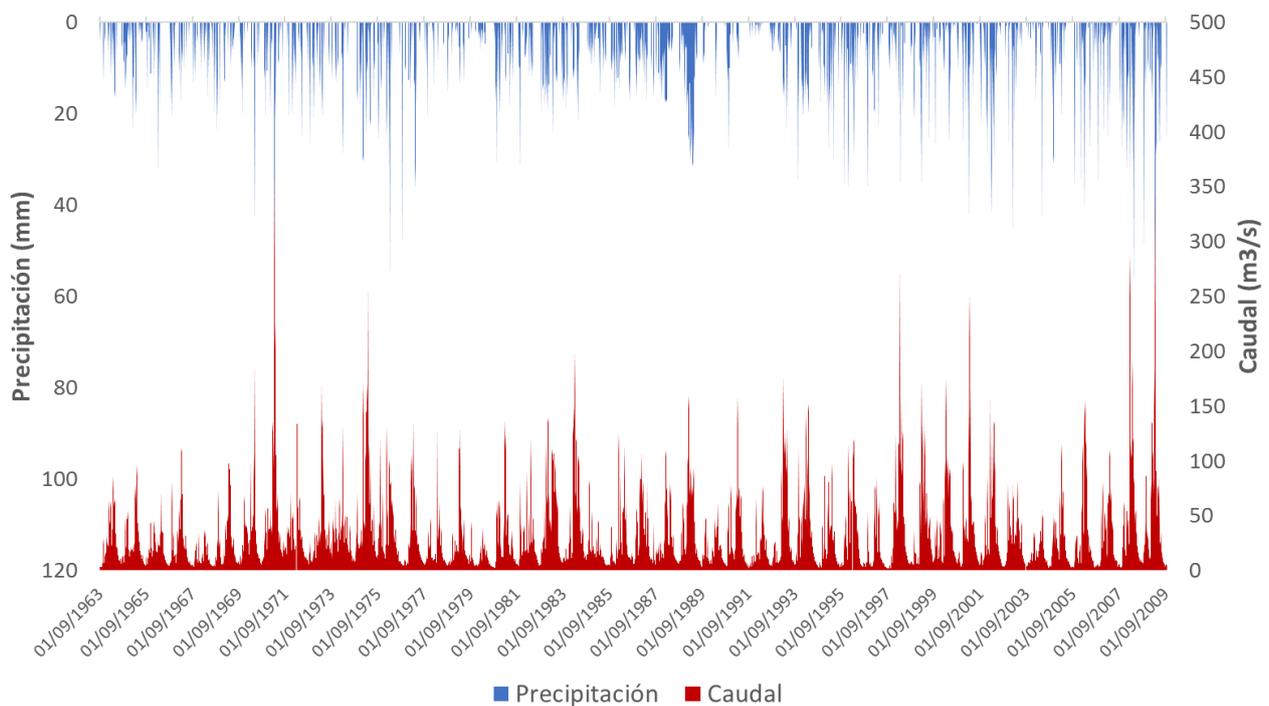


Figura 6.8 Serie de datos diarios de flujo de lluvia (estación climática Chugur) y caudal (estación Racarumi) para el período 1963-2009

Aunque la longitud de la serie temporal de caudal máximo anual representa una limitación en términos de análisis de frecuencia de caudales, se procede en cualquier caso, al ajuste de diferentes funciones de distribución extrema a fin de reflejar los datos originales de la mejor manera (Figura 6.9, Cuadro 6.3). De entre las diferentes funciones analizadas, la Distribución Generalizada de Valores Extremos (*GEV* por sus siglas en inglés) ajustada usando el método de los L-momentos fue la que mejor ajuste proporcionó en comparación con las otras distribuciones típicamente usadas en este tipo de análisis (*Gumbel*, *Three-parameter Log-normal*, *Pearson Type III*).

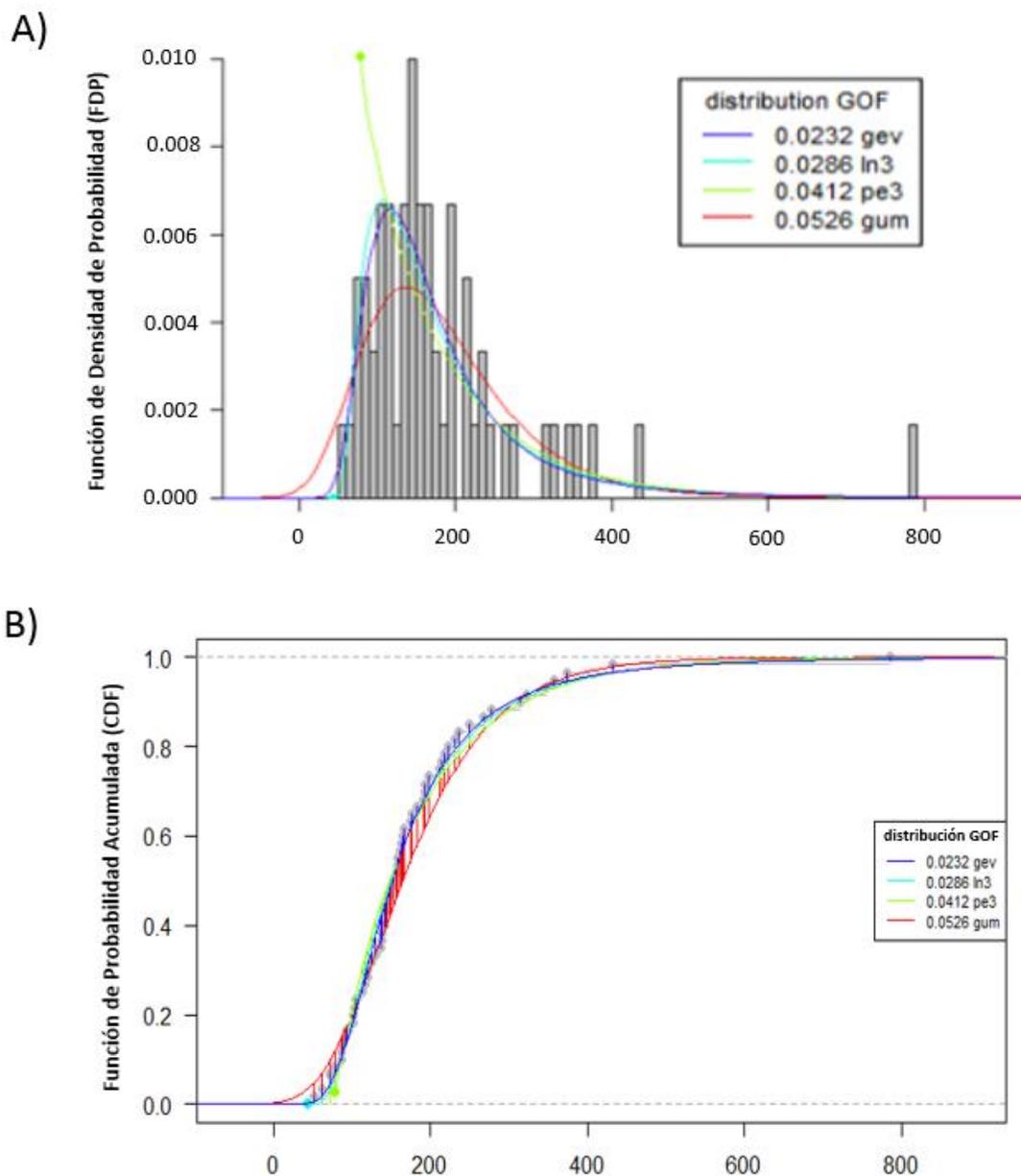


Figura 6.9 (A) Histograma con valores máximos de caudal diario para diferentes funciones de densidad de probabilidad (FDPs) con ajuste según el método de los L-momentos. (B) Función de probabilidad acumulada (CFD) de caudal máximo anual. Las barras verticales muestran la desviación de la función de distribución ajustada con la función de distribución empírica. Las barras están agregadas según el RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio) para mostrar la bondad del ajuste (GOF).

Cuadro 6.3. Resumen de los parámetros de bondad del ajuste utilizado para comparar diferentes funciones de distribución. *Ks p-value* representa la bondad del ajuste según el test de Kolmogorov-Smirnov.

Función	RMSE	R2	Ks p-value
GEV	0.023	0.99	0.78
LN3	0.029	0.99	0.63
PE3	0.041	0.98	0.40
GUM	0.053	0.98	0.45

El resultado basado en el conjunto de datos históricos se grafica en la Figura 6.10 , donde también se muestra el 95% del intervalo de confianza. Los intervalos de confianza se calculan usando un método de arranque con 1000 iteraciones.

Distribución Generalizada de Valores Extremos (método de ajuste de los L-momentos)

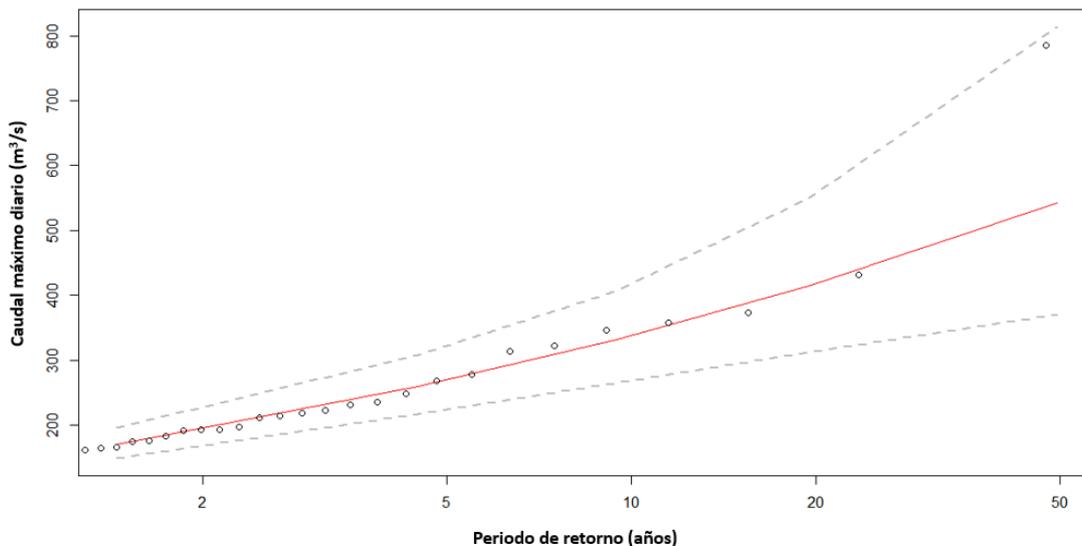


Figura 6.10 Análisis del valor extremo de caudal máximo anual para la estación Racarumi para el período de 1963-2009; las líneas discontinuas representan el 95% del intervalo de confianza para un ajuste según la función de distribución Generalizada de Valores Extremos y ajustada por el método de los L-momentos.

6.3.2 Modelo de regresión precipitación-caudal máximo

A fin de predecir el caudal máximo esperado en la estación de Racarumi según la precipitación en la cuenca, se realizó un análisis de regresión simple entre el valor máximo anual de caudal diario y la precipitación acumulada en el periodo inmediatamente precedente al registro de caudal. Para el análisis se consideraron periodos de acumulación de duración variable (5, 10, 20 y 30 días). Las regresiones se evaluaron para 6 estaciones meteorológicas (Chugur, Cochabamba, Bambamarca, Chancay-Baños, Quilcate, San Miguel).

El mayor índice de correlación se encontró con la estación de Chugur y para la precipitación acumulada en los 10 días precedentes al caudal máximo observado ($R^2 = 0.252$, ver Figura 6.11).

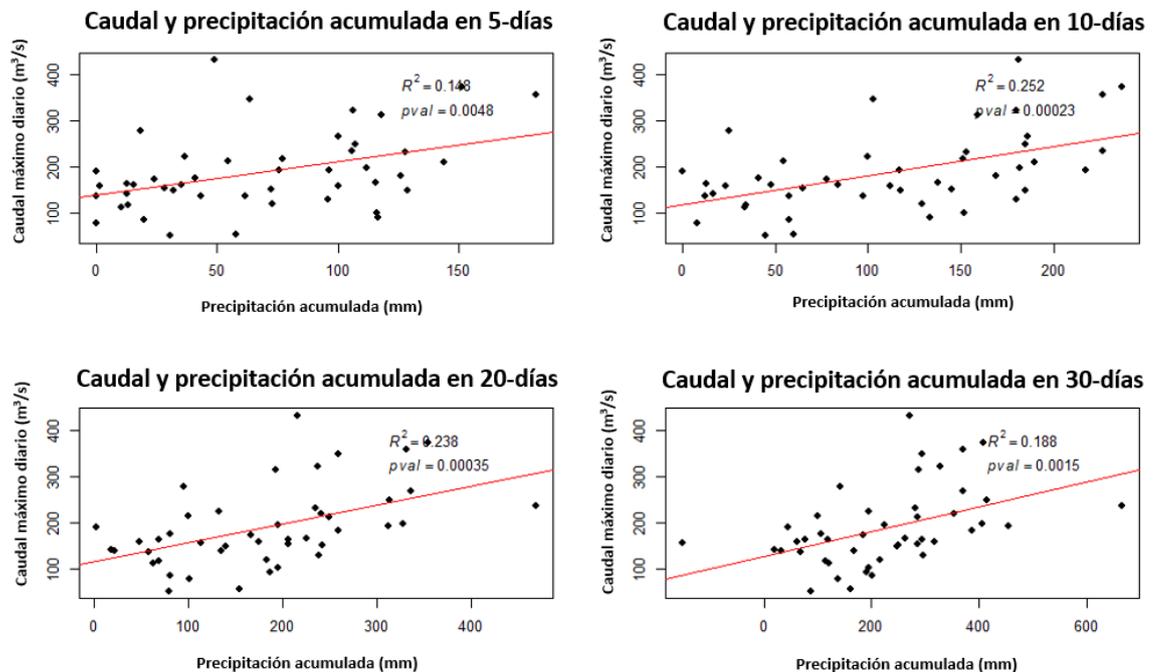


Figura 6.11 Modelo de regresión lineal simple entre el caudal máximo anual observado en Racarumi y la precipitación acumulada en la estación de Chugur en el periodo inmediatamente precedente (de duración 5, 10, 20 y 30 días). Periodo de análisis: 1963-2009.

Debido a la débil correlación encontrada, los valores estimados por el modelo de regresión simple fueron corregidos en una segunda etapa de acuerdo con los valores históricos observados. En lo sucesivo, el análisis de extremos se realizará tomando como base los valores de caudal máximos estimados con el modelo de regresión y posteriormente corregidos.

6.3.3 Análisis de niveles críticos de flujo bajo cambio climático

En este análisis se estima la sensibilidad del periodo de retorno calculado para diferentes niveles críticos de caudal (150, 200 y 300 m^3/s) a los cambios en la precipitación media. Para realizar el análisis se procede de la siguiente manera. Primero se genera una amplia gama de condiciones de precipitación modificando la precipitación histórica en la estación de Chugur entre un -50% y +50%. A continuación, y para cada serie climática generada, se estiman los valores de caudal máximo diario predichos en la estación de Racarumi según la relación encontrada previamente y los valores de precipitación acumulada en 10 días en la estación de Chugur (Figura 6.11). En tercer lugar, y para cada escenario climático, se extraen los máximos anuales de caudal diario para el periodo analizado, se ajusta una función GEV, y se calculan los periodos de retorno para los tres niveles críticos de caudal.

La Figura 5.16 muestra los periodos de retorno calculados para el nivel de alerta rojo (300 m^3/s), naranja (200 m^3/s) y amarillo (150 m^3/s) bajo los cambios de precipitación media anual de -50, -25, 0, 25% y 50%. En condiciones históricas (sin cambios en la precipitación media), el nivel de alerta rojo (300 m^3/s) tiene un periodo de retorno de 9.3 años.

Bajo condiciones futuras más húmedas, el mismo nivel de descarga tiene un período de retorno sustancialmente más pequeño (6.5 con un aumento de la precipitación del 25% y 4.7 años bajo un aumento de precipitación del 50%), lo que indica un alto riesgo de inundación. Los períodos de retorno para los otros dos niveles críticos (150 m³/s y 200 m³/s) también se acortan notablemente en condiciones futuras más húmedas, incrementándose el riesgo de inundaciones.

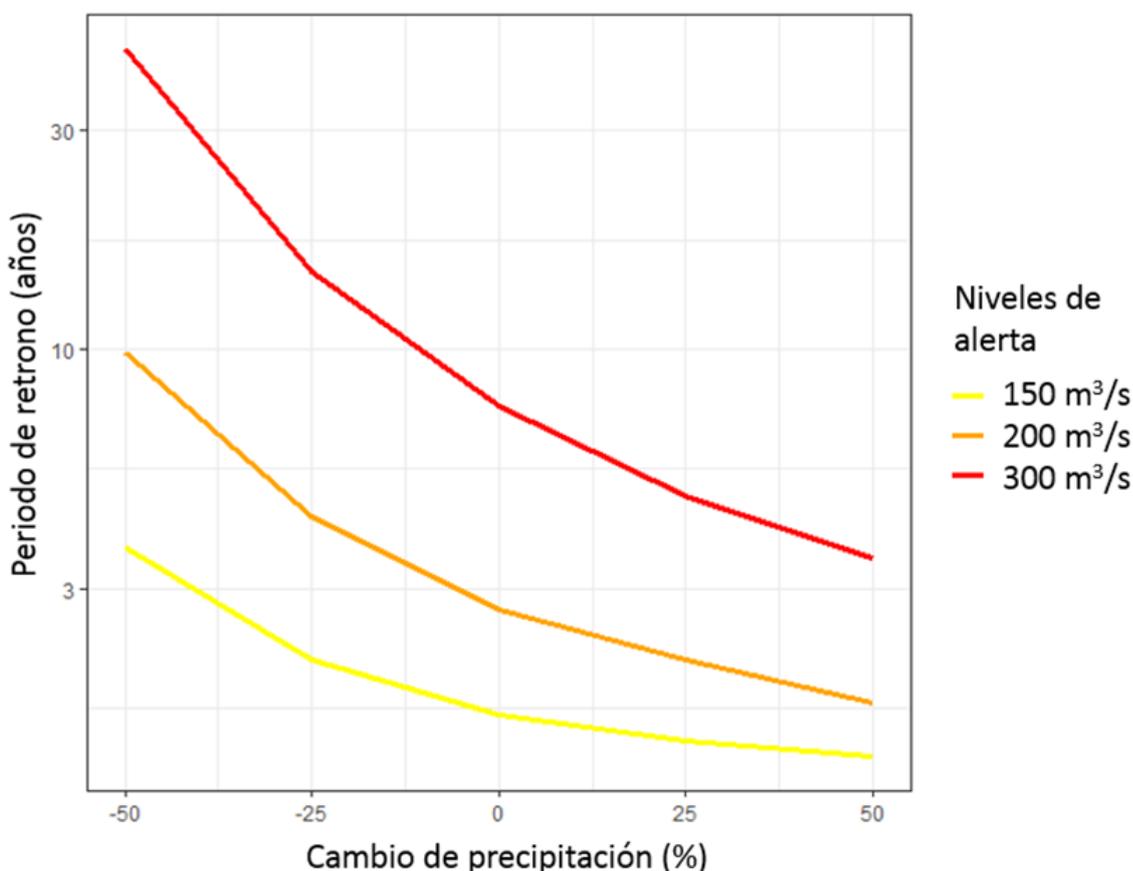


Figura 6.12 Valores del periodo de retorno para diferentes niveles de caudal crítico y escenarios de cambio en la precipitación media anual.

Finalmente, se proporcionan los rangos de incertidumbre plausibles para los períodos de retorno de los tres niveles de caudal crítico de acuerdo a los patrones de cambio de precipitación proyectados por los modelos GCMs del proyecto CMIP5. Adoptando un intervalo de confianza del 95%, el cambio en la precipitación media anual proyectado por los modelos del CMIP5 para el período de 2035-2065 (centrado en el año 2050) oscila entre un -35% a 32% del promedio histórico. Los periodos de retorno para esta horquilla de valores y cada nivel de caudal crítico se han estimado finalmente por interpolación lineal según las curvas de la Figura 6.12. Los resultados muestran que el período de retorno del nivel de caudal crítico de 300 m³/s (alerta roja) oscilaría entre 5 y 39 años para un escenario de aumento del 32% o de reducción del 35% de la precipitación media anual, respectivamente.

Cuadro 6.4 Intervalos de retorno estimados para los tres niveles de alerta establecidos para el caudal máximo diario en Racarumi.

Niveles Críticos de Descarga	Período de retorno (histórico)	Período de retorno debido a cambio climático	
		min plausible (precip. +32%)	max plausible (precip. -35%)
Alerta amarilla (150 m ³ /s)	1.5 años	2.1 años	4 años
Alerta naranja (200 m ³ /s)	3.8 años	2.5 años	9 años
Alerta roja (300 m ³ /s)	9.3 años	5 años	39 años

6.4 Síntesis

Se realizó un análisis de evaluación rápida para determinar la magnitud de los impactos ocasionados por incertidumbres climáticas y no climáticas. En una primera etapa se realizó un análisis rápido del riesgo de suministro de agua, realizándose a su vez un análisis de sensibilidad sobre las reglas de asignación en el suministro de agua. Finalmente, en la segunda etapa se realizó un análisis inicial del riesgo de inundación. Se concluye lo siguiente:

Respecto del análisis del riesgo de suministro de agua:

- Se divide este análisis en 3 pasos, primero se analiza la sensibilidad de factores de incertidumbre; a continuación, se calcula la elasticidad de cada indicador para finalmente estimar los rangos de rendimiento plausibles para los indicadores de desempeño.
- En el primer paso, se aplicó el modelo WEAP, considerando un período de simulación de 40 años (1970-2010) y tomando en cuenta 7 factores de incertidumbre (TEMP-PROM, PREC-PROM, PREC-EHUM, DEM-POBL, DEM-RIEGO, ACUM-SEDIM, y TRASVASE-MES). Se observa que la confiabilidad del suministro de agua poblacional es insensible para todos los parámetros, excepto para la demanda poblacional; asimismo la vulnerabilidad de dicho suministro es de 0,1 MCM/mes bajo un incremento de 40% en la demanda poblacional. Por otro lado, la confiabilidad de la irrigación es altamente sensible a PREC-PROM comparada con el resto de parámetros; de forma similar, la vulnerabilidad de la irrigación presenta como factores más importantes a PREC-PROM y DEM-RIEGO.
- En el segundo paso, se observa que la confiabilidad para satisfacer la demanda poblacional se muestra inelástica para todos los parámetros excepto para DEM-POBL. Sin embargo, la magnitud del valor de elasticidad es bajo (-0.01). Respecto de la confiabilidad para abastecer la demanda de riego, las elasticidades más altas se han mostrado para TEMP-PROM (-1.81), seguido de PREC-PROM (0.76), DEM-RIEGO (-0.74) y ACUM-SEDIM (-0.66).

- Finalmente, en el tercer paso, se observa que el rango de desempeño para la demanda poblacional es bastante estrecho, dado que la demanda poblacional se muestra previamente como inelástica para casi todos los parámetros evaluados. En el caso de la confiabilidad para satisfacer la demanda se observan rangos plausibles de desempeño entre 40-70% para DEM-RIEGO, 50-100% para MEAN-PRECIP, 68-75% para TEMP-PROM, y 75-78% para TRAVASE-MES. Estos resultados sugieren que, a excepción de escenarios climáticos muy húmedos, la confiabilidad para satisfacer la demanda de riego está siempre por debajo del umbral de desempeño del 80% especificado por los actores locales.

Respecto del análisis de sensibilidad sobre las reglas de asignación en el suministro de agua:

- Se evaluó la sensibilidad del desempeño en función a cambios en las reglas de asignación de agua en el modelo WEAP, definiendo tres esquemas alternativos de priorización: *Prioridad poblacional*, *Prioridad de Riego* y *Prioridad Equitativa*; en condiciones secas y húmedas.
- En condiciones normales, la confiabilidad para satisfacer la demanda poblacional se reduce desde aproximadamente el 100% hasta el 71% cuando se prioriza la satisfacción de la demanda de riego. En contraste, encontramos que la confiabilidad del suministro de riego muestra un ligero aumento cuando la demanda de riego resulta ser priorizada. Estos resultados indican que la confiabilidad del suministro poblacional es altamente sensible a la regla de prioridad seleccionada, mientras que la confiabilidad del riego es relativamente insensible.
- Se concluye que no existe una razón de peso para cambiar la regla de prioridad existente en el actual modelo WEAP, que prioriza la satisfacción de la demanda de agua poblacional frente al resto de usos.

Respecto del análisis del riesgo de inundación

- Se evaluó el riesgo de inundación a través de un análisis simple de valores extremos de caudal y un análisis de sensibilidad de los cambios en la precipitación media.
- Los resultados derivados sugieren que la recurrencia de caudales superiores al nivel crítico (300 m³/s), y por tanto el riesgo del sistema a sufrir inundaciones, es muy sensible a las condiciones climáticas proyectadas para la región. Para confirmar estos resultados, se ha considerado realizar un análisis específico del riesgo de inundación en la Prueba de Estrés Climático.

De los siete factores de incertidumbre, climáticos y no climáticos, evaluados se han identificado tres factores que resultan clave en la ejecución de la Fase III, estos son: cambios los valores de precipitación y temperatura media, y cambio en los valores de demanda de agua para los escenarios de desarrollo futuros contemplados para la cuenca.

7 Fase III: Prueba de Estrés Climático

7.1 Resumen del proceso e implementación

La implementación de la Prueba de Estrés Climático tiene como objetivo identificar las futuras vulnerabilidades y evaluar la magnitud de los riesgos del sistema Chancay-Lambayeque con respecto a de los factores de incertidumbre. Como se ha descrito en el Capítulo 5, estas incertidumbres cubren una cantidad de factores climáticos y no-climáticos que incluyen la variabilidad natural del clima, los cambios a largo plazo en los promedios de temperatura y de precipitación, y los cambios en los futuros niveles de demanda de agua debido al incremento del desarrollo de la agricultura y el aumento poblacional.

La Prueba de Estrés Climático comienza tomando una muestra amplia de posibles condiciones futuras, para posteriormente calcular los indicadores de desempeño específicos en cada caso. Los resultados a lo largo del rango de posibles futuros son posteriormente resumidos en términos de la robustez específica del sistema y las medidas de resiliencia. El procedimiento requiere el uso de una serie de herramientas estadísticas y de simulación, estos son:

- un *generador de clima* para muestrear la variabilidad climática natural y combinarla con un amplio rango de cambios climáticos futuros.
- un *modelo hidrológico* para simular el caudal en la cuenca para las condiciones climáticas simuladas (en este caso, el modelo HydroBiD de Chancay-Lambayeque).
- un *modelo de evaluación y asignación de recursos hídricos* para evaluar el balance hídrico mensual en el sistema de recursos hídricos y las asignaciones de agua para las demandas de agua poblacional y de riego (en este caso, el modelo WEAP de Chancay-Lambayeque).

La implementación de la prueba de estrés implica cuatro pasos analíticos (Figura 7.1)

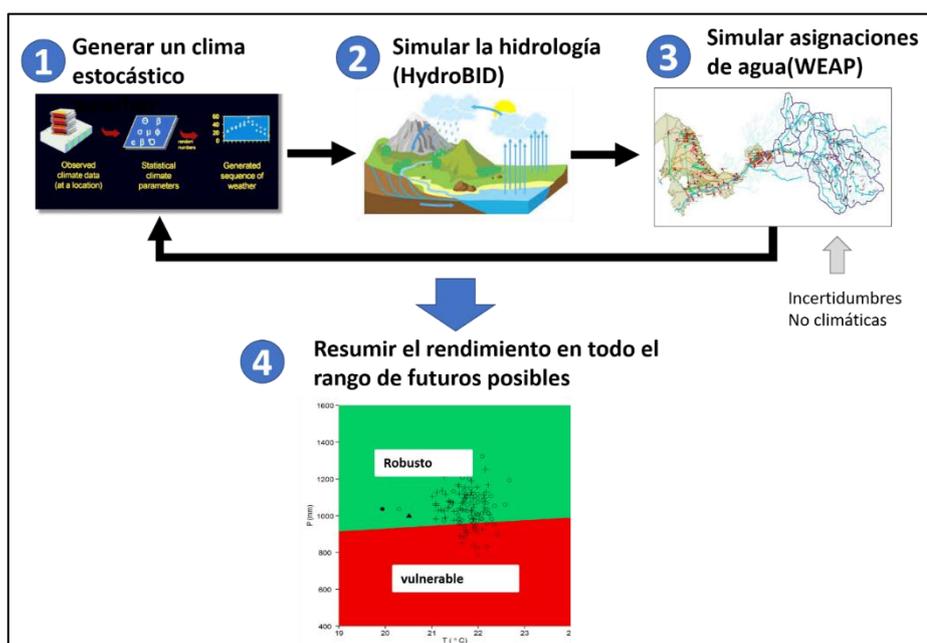


Figura 7.1 Diagrama de flujo de la prueba de esfuerzo de Chancay-Lambayeque.

La primera etapa tiene como objetivo la generación de nuevas realizaciones climáticas representativas del clima del área bajo estudio. Para la cuenca Chancay-Lambayeque se ha empleado un generador de clima que ha sido parametrizado para reproducir las características climáticas históricas en la cuenca (ver Apéndice A6). Utilizando el generador de clima se ha generado cinco realizaciones climáticas, cada una con una duración de 32 años, con valores de temperatura y precipitación diaria distribuidos espacialmente de acuerdo a la ubicación de las estaciones meteorológicas.

La Figura 7.2 ilustra la precipitación anual promediada en la cuenca para cada una de las cinco realizaciones sintéticas generadas y su comparación con la precipitación histórica anual observada en el periodo 1987-2010. Estas cinco realizaciones proporcionan una buena representación de la variabilidad natural observada en el registro histórico en el que los valores de precipitación anual oscilan entre los 300 y los 1100 mm.

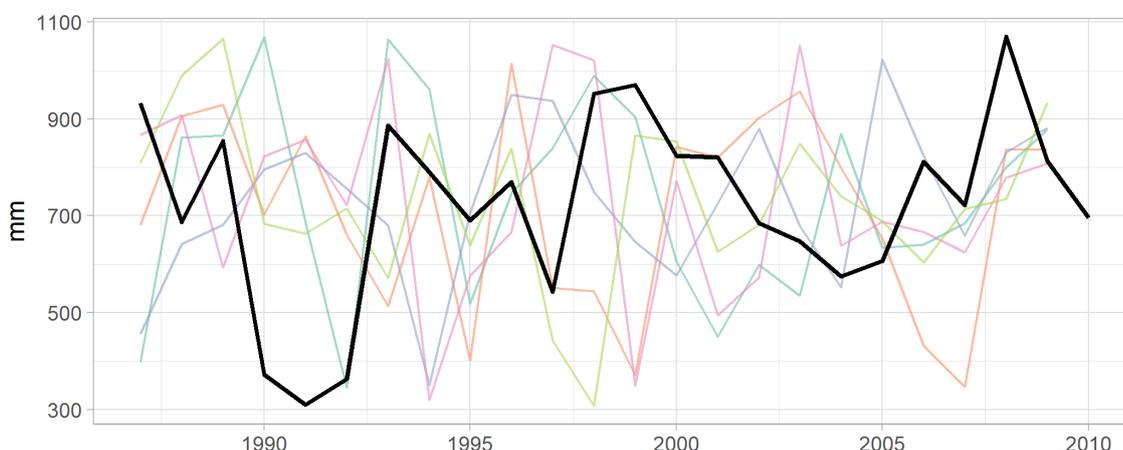


Figura 7.2 Serie de precipitación anual promediada por área de cinco realizaciones de clima (mostradas en diferentes colores) en comparación con la precipitación histórica anual (en negro).

En una segunda fase se imponen cambios climáticos a largo plazo (en la temperatura y precipitación media anual, en el caso del sistema Chancay-Lambayeque) sobre cada una de las cinco realizaciones climáticas sintetizadas. Para reflejar el abanico de cambios en la temperatura promedio, se definen seis factores aditivos de cambio desde 0 a 5°C con incrementos de 1°C. Para los cambios en la precipitación promedio, se adoptan seis factores multiplicativos de cambio desde 0.6 a 1.4 con incrementos de 0.2. Para ambas variables, el rango de incertidumbre definido va más allá de los cambios proyectados por los modelos climáticos para el año 2050 (ver sección 5.2) para poder explorar un rango mayor de condiciones climáticas futuras. Los cambios climáticos se aplican en régimen transitorio, es decir gradualmente empezando con la condición actual en el primer año de simulación hasta los valores especificados al final del período de análisis de 32 años como se ilustra en las Figure 7.3 y 7.4.

En general, el proceso de generación de climas resulta en un conjunto de 180 posibles realizaciones climáticas que resultan de la combinación de seis patrones de cambio de temperatura promedio y precipitación promedio, y cinco repeticiones.

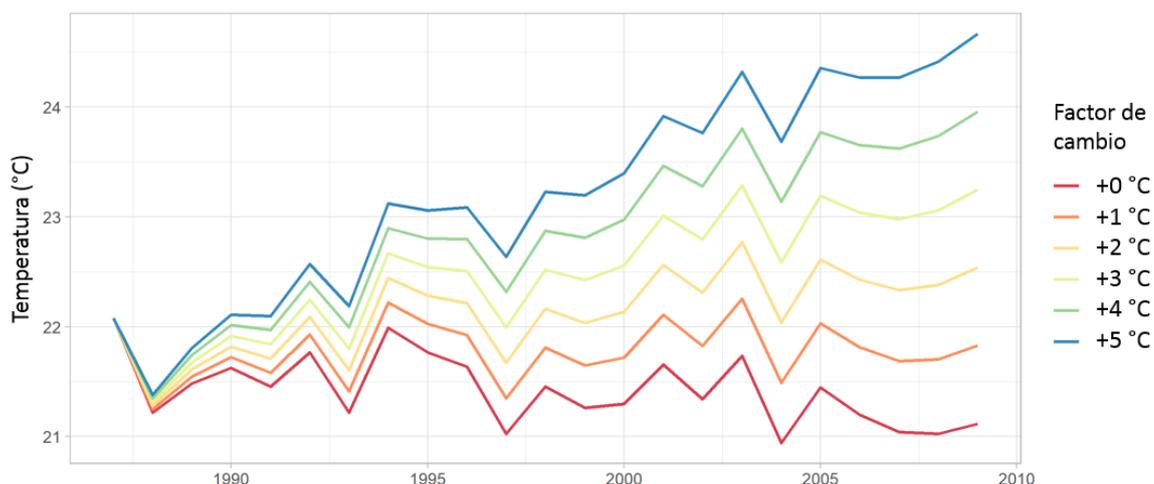


Figura 7.3 Aplicación de los factores de cambio aditivo (de 0 a 5 °C) sobre la temperatura anual para una realización climática.

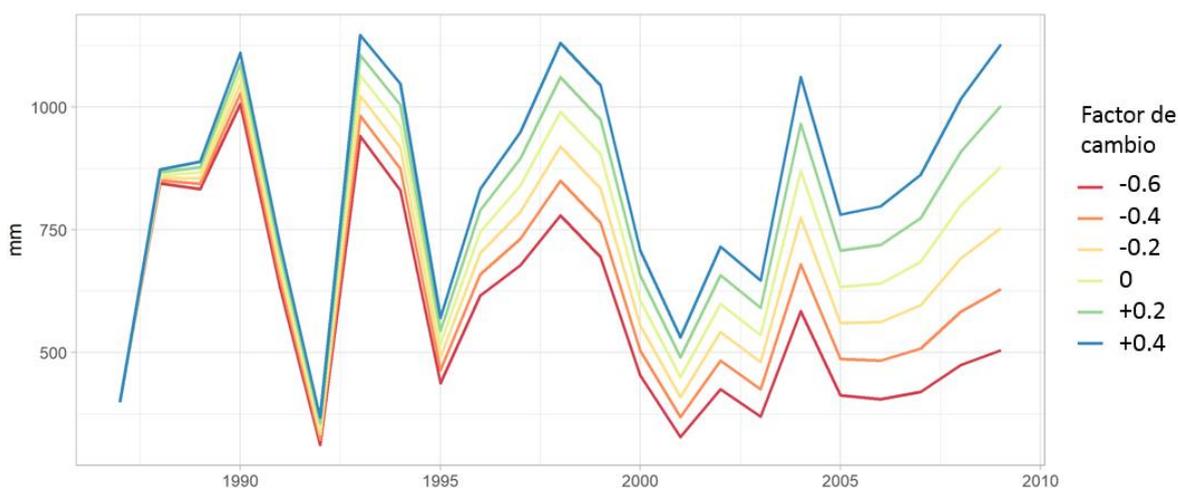


Figura 7.4 Aplicación de los factores de cambio multiplicativo aditivo (de -0.6 a 0.4) sobre la precipitación anual para una realización climática.

En general, el conjunto de 180 escenarios climáticos obtenidos a partir del generador de clima, explora tanto la variabilidad natural del clima como los posibles cambios climáticos que pueden ocurrir en el futuro. A medida que los escenarios combinan secuencias climáticas generadas aleatoriamente con tendencias climáticas, también se incluyen nuevos eventos extremos más allá de la variabilidad histórica en los escenarios resultantes.

En la siguiente etapa, se fuerza el modelo hidrológico HydroBID con cada una de las 180 realizaciones climáticas para obtener sendas series de caudal diario. Las series de caudal mensual obtenidos a partir de los datos diarios son finalmente utilizadas para forzar el modelo de evaluación y gestión de recursos WEAP con el objeto de simular la asignación de agua entre los diferentes nodos de demanda existentes en la cuenca, obtener así los indicadores de confiabilidad, vulnerabilidad y resiliencia para cada una de las incertidumbres climáticas y no climáticas (escenarios de demanda futura).

Durante el Análisis Inicial del DTF (Fase II, Sección 6), la demanda de agua poblacional no se ha identificado como un factor de incertidumbre de especial relevancia debido al impacto relativamente pequeño en los indicadores de desempeño. Tampoco resultó el sistema especialmente sensible a la regla de priorización para la asignación de agua adoptada de en el modelo WEAP. Por tanto, y para considerar las proyecciones de incremento de la demanda de agua poblacional se adoptó una trayectoria de cambio prescrita de acuerdo con las proyecciones recogidas en los planes de desarrollo de la región. La aproximación adopta una trayectoria de aumento gradual de la demanda poblacional desde los niveles de línea de base hasta los niveles proyectados para una ventana temporal de 32 años (longitud de las simulaciones realizadas)

Para reconocer el impacto del aumento de la demanda de agua para riego, se han considerado cuatro escenarios de aumento de la demanda:

- Las áreas irrigadas no se incrementan, es decir, se mantienen a niveles de línea de base (RIEGO-BASE)
- Las áreas irrigadas se incrementan según lo proyectado para el año 2035 de acuerdo con los planes de desarrollo agrícola e hidráulicos de la cuenca (RIEGO-2035)
- Las áreas irrigadas se incrementan a 150% de lo proyectado para el año 2035 (RIEGO-2035x1.5)
- Las áreas irrigadas se incrementan a 200% de lo proyectado para el año 2035 (RIEGO-2035x2.0)

Estos cuatro escenarios de desarrollo de irrigación son específicos para las regiones Cajamarca y Chiclayo según lo especificado en el

Cuadro 7.1. Es importante anotar que para el horizonte de simulación de 32 años se asume el mantenimiento y el manejo de la actual matriz de cobertura de vegetación (ver Apéndice A7) para una descripción más detallada).

La combinación de los 180 escenarios climáticos y los 4 escenarios de demanda de riego da lugar a un 720 posibles futuros a evaluar en a la Prueba de Estrés Climático (Cuadro 7.2).

Cuadro 7.1 Niveles de demanda futura explorados en la prueba de estrés.

Escenario	Incremento en las áreas irrigadas en el departamento de Lambayeque (ha)	Incremento en las áreas irrigadas en el departamento de Cajamarca (ha)
RIEGO-BASE	0 (sin incremento)	0 (sin incremento)
RIEGO- 2035	1,700	30,000
RIEGO-2035x1.5	2,550	45,000
RIEGO-2035x2.0	3,400	60,000

Cuadro 7.2 Diseño experimental de la Prueba de Estrés Climático considerando los factores climáticos y no-climáticos.

Factor de incertidumbre	Descripción
Variabilidad climática natural	Para nuevas secuencias de clima histórico, con propiedades estadísticas similares
Precipitación media (°C)	Seis cambios graduales que resultan en incrementos de 0, 1, 2, 3, 4 y 5°C sobre el período especificado.
Temperatura media (%)	Seis cambios graduales que resultan en cambios de -60, -40, -20, 0, 20 y 40% en condiciones promedio.
Áreas irrigadas (%)	Cuatro escenarios de desarrollo de irrigación: no cambio, y expansiones del 100%, 150% y 200% de la nueva superficie de riego planeada para el horizonte 2035.

7.2 Resultados

7.2.1 Impacto del clima en los caudales

Antes del análisis de vulnerabilidad con respecto a los indicadores de desempeño especificados, es útil comprender cómo responde la hidrología de la superficie a los posibles cambios futuros del clima. La Figura 7.5 muestra la Superficie de Respuesta al Clima obtenida para el caudal máximo diario estimado en la estación Racarumi para los cambios evaluados en la precipitación media (%) y la temperatura media (°C). Los caudales diarios calculados varían desde aproximadamente 13 m³/s a 50 m³/s (el caudal diario histórico en Racarumi fue de aproximadamente 34.1 m³/s en el periodo 1970-2010). Como es esperado, y así lo indican las Superficies de Respuesta al Clima, el caudal medio es más sensible a los cambios de precipitación que a los de temperatura.

En la Figura 7.5, los puntos indican los cambios proyectados de los modelos CMIP5 para el año 2050. Usamos esta información como un proxy de probabilidad de futuros cambios (indicado por el rango de color). En base a los resultados, se observa que la mayoría de las proyecciones del modelo se agrupan dentro de un rango estrecho de cambios entre los 26 y los 38 m³/s (similar a las condiciones históricas). Sin embargo, algunos modelos indican condiciones más secas y unos pocos modelos muestran condiciones medias extremadamente secas con valores de caudal medio diario inferiores a los 20 m³/s.

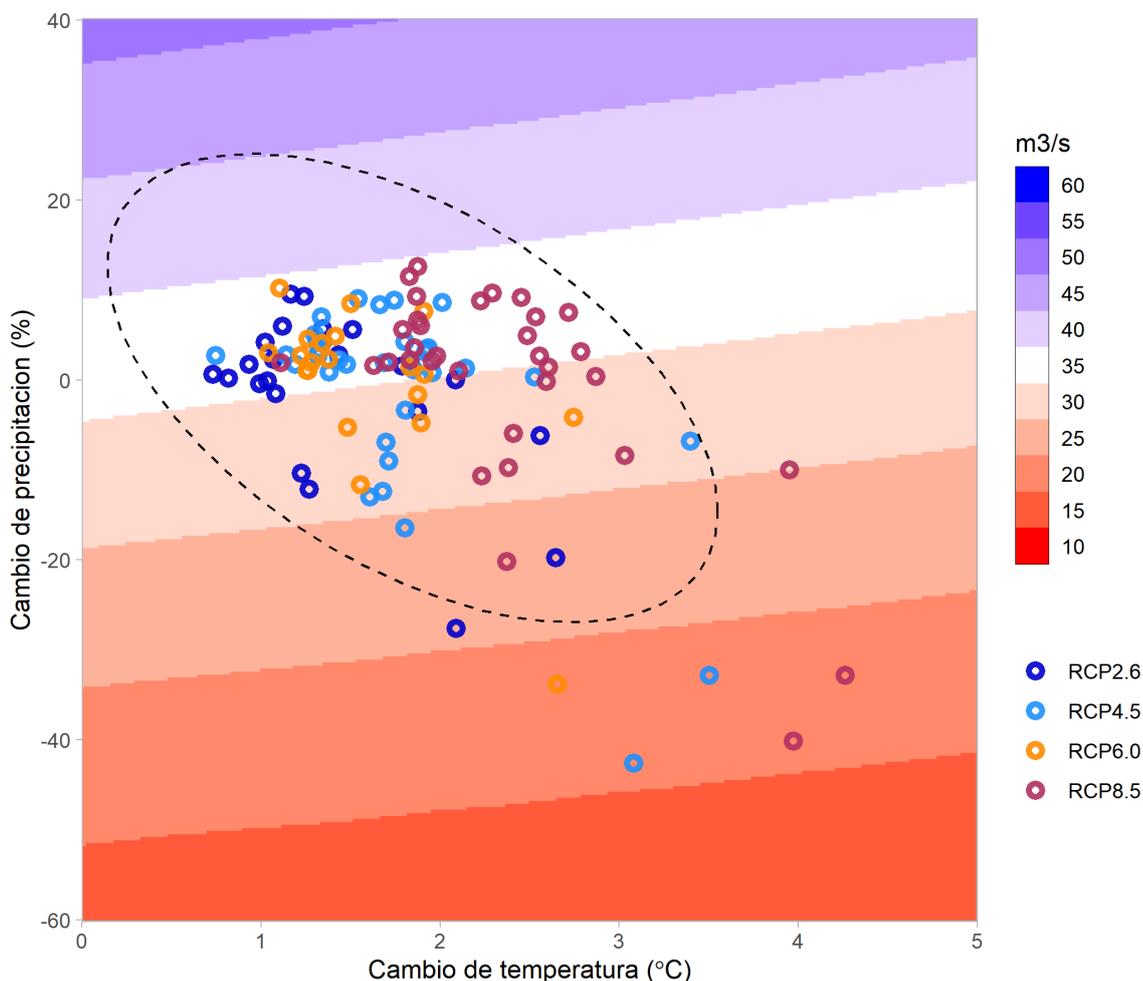


Figura 7.5 Superficie de Respuesta al Clima para el caudal medio diario en Racarumi (m^3/s). Los puntos muestran las proyecciones de CMIP5 para el año 2050. La elipse muestra un Intervalo de confianza del 95% de las proyecciones para observar las probabilidades de cambios climáticos futuros.

7.2.2 Suministro poblacional y de riego.

Evaluamos el desempeño medio del sistema para satisfacer la demanda de agua en la cuenca mediante el cálculo de los indicadores de confiabilidad y vulnerabilidad según han quedado definidos en la sección 4.1.1. Para este análisis, se calculan los indicadores de desempeño para cada una de las 720 realizaciones de simulación, y se promedian sobre la dimensión de las realizaciones de variabilidad natural. Cada valor del indicador se promedia para cada una de las trayectorias climáticas de variabilidad natural evaluadas, y los resultados son finalmente mostrados a través de la Superficie de Respuesta al Clima (SRC). Finalmente, sobre la SRC se superpone la variabilidad proyectada por cada uno de los modelos del proyecto CMIP5 con el objetivo de obtener una estimación de la robustez del sistema frente a las proyecciones de cambio climático.

La Figura 7.6 muestra las SRC para el indicador de confiabilidad bajo las condiciones de desarrollo de irrigación de línea de base (RIEGO-BASE). La confiabilidad para satisfacer la demanda poblacional (Figura 7.6-a) varía de 82.5% a 100% para el rango de trayectorias climáticas evaluadas. La tasa de cambio en la confiabilidad se ve más afectada por los cambios en la precipitación que en la temperatura (ver la dirección de las curvas de nivel).

El umbral de aceptación para la confiabilidad de la demanda poblacional del 95% se satisface en la mayoría de las condiciones futuras, excepto cuando la precipitación media se reduce en un 35% o más. La mayoría de las proyecciones climáticas también indican que se puede alcanzar el umbral de confiabilidad objetivo del 95%, con pocos valores atípicos con un valor de confiabilidad del 90 a 95%. La confiabilidad para la demanda de riego (Figura 7.6-b) varía entre el 50% y el 90% a lo largo del rango de trayectorias climáticas evaluadas. Para la confiabilidad de la demanda de riego, los cambios de temperatura también tienen un importante efecto ya que la demanda de agua de cultivo en el modelo WEAP es sensible a los cambios de temperatura. Los resultados indican que el objetivo de confiabilidad para la demanda de riego del 80% se puede cumplir para condiciones climáticas similares a las históricas, y en condiciones futuras más cálidas y templadas. El rango de confiabilidad para la satisfacción de la demanda de riego oscila entre el 65% y el 85% para el rango de confianza de las proyecciones climáticas. Bajo las proyecciones climáticas más extremas, se observa que la confiabilidad caería a niveles del 55%.

La Figura 7.7 ilustra las SRC para el indicador de vulnerabilidad de la demanda poblacional y de riego. La confiabilidad del suministro doméstico es inferior a 0,1 en todas las trayectorias climáticas evaluadas (Figura 7.7-a). Dentro de la banda de confianza de las proyecciones climáticas, la demanda poblacional no es vulnerable al cambio climático. La confiabilidad del suministro de irrigación es relativamente alta, con un rango que oscila entre el 0.05 y 0.45 (Figura 7.7-b). Sin embargo, la vulnerabilidad del riego dentro de la banda de confianza de las proyecciones climáticas es menor, entre 0.1 y 0.3.

La vulnerabilidad del sistema para la demanda de riego (Figura 7.7-b) varía de 0.4 a 0.55 y por lo tanto es sustancialmente mayor que la vulnerabilidad de la demanda poblacional. De forma similar a los hallazgos para el indicador de confiabilidad (Figura 6-b), el indicador de vulnerabilidad también es altamente sensible a los cambios en la temperatura media (ver la dirección de las curvas). Las proyecciones climáticas muestran que es más probable que ocurra un valor de vulnerabilidad de aproximadamente 0.47.

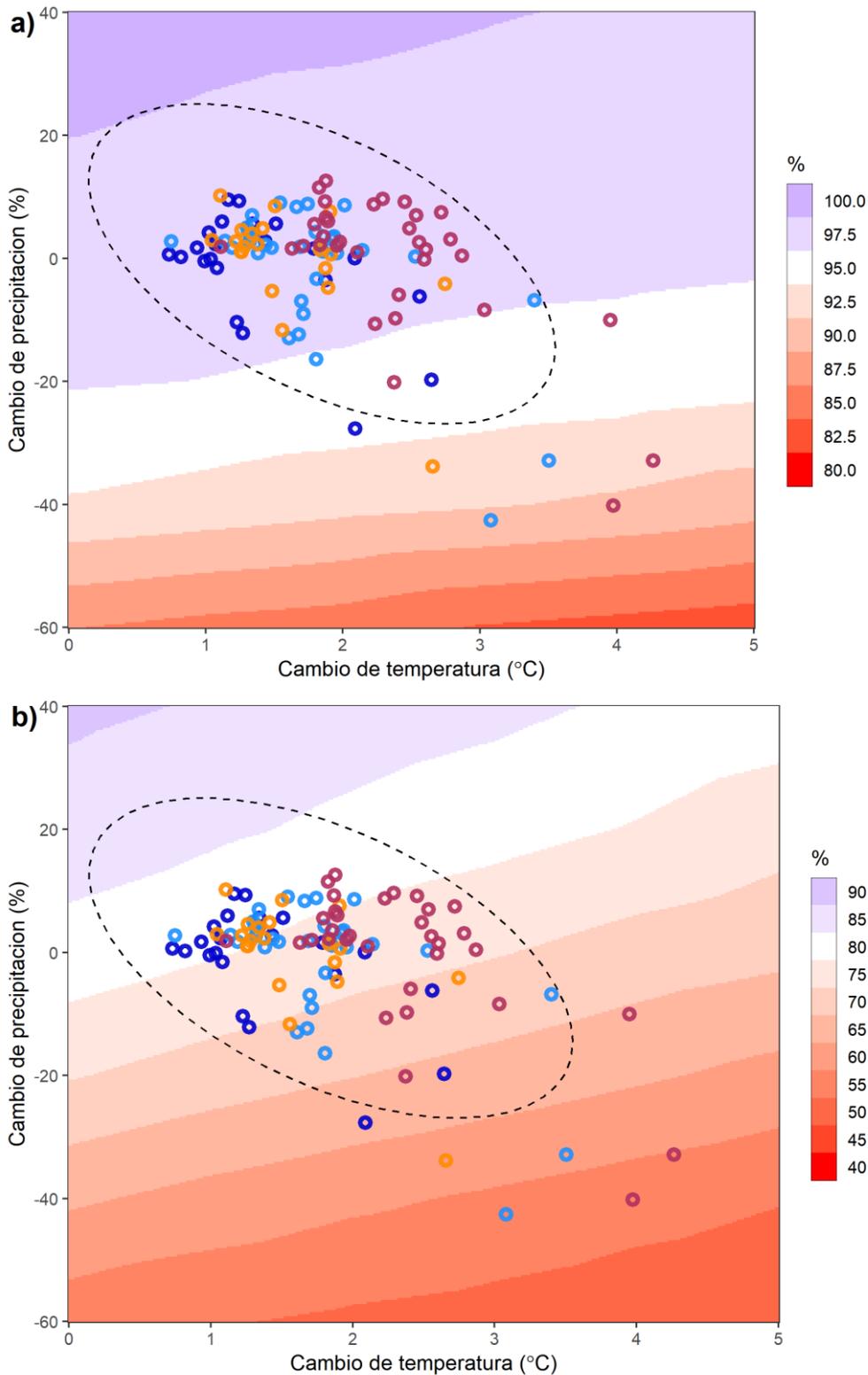


Figura 7.6 Superficies de Respuesta al Clima (SRC) de la confiabilidad (%) para satisfacer la demanda de agua poblacional (a) y de riego (b). En ambas Figura s, los puntos superpuestos representan los cambios climáticos proyectados por los modelos-GCM del proyecto CMIP5. La elipse muestra el intervalo de confianza del 95% de las proyecciones para observar las probabilidades de cambios climáticos futuros.

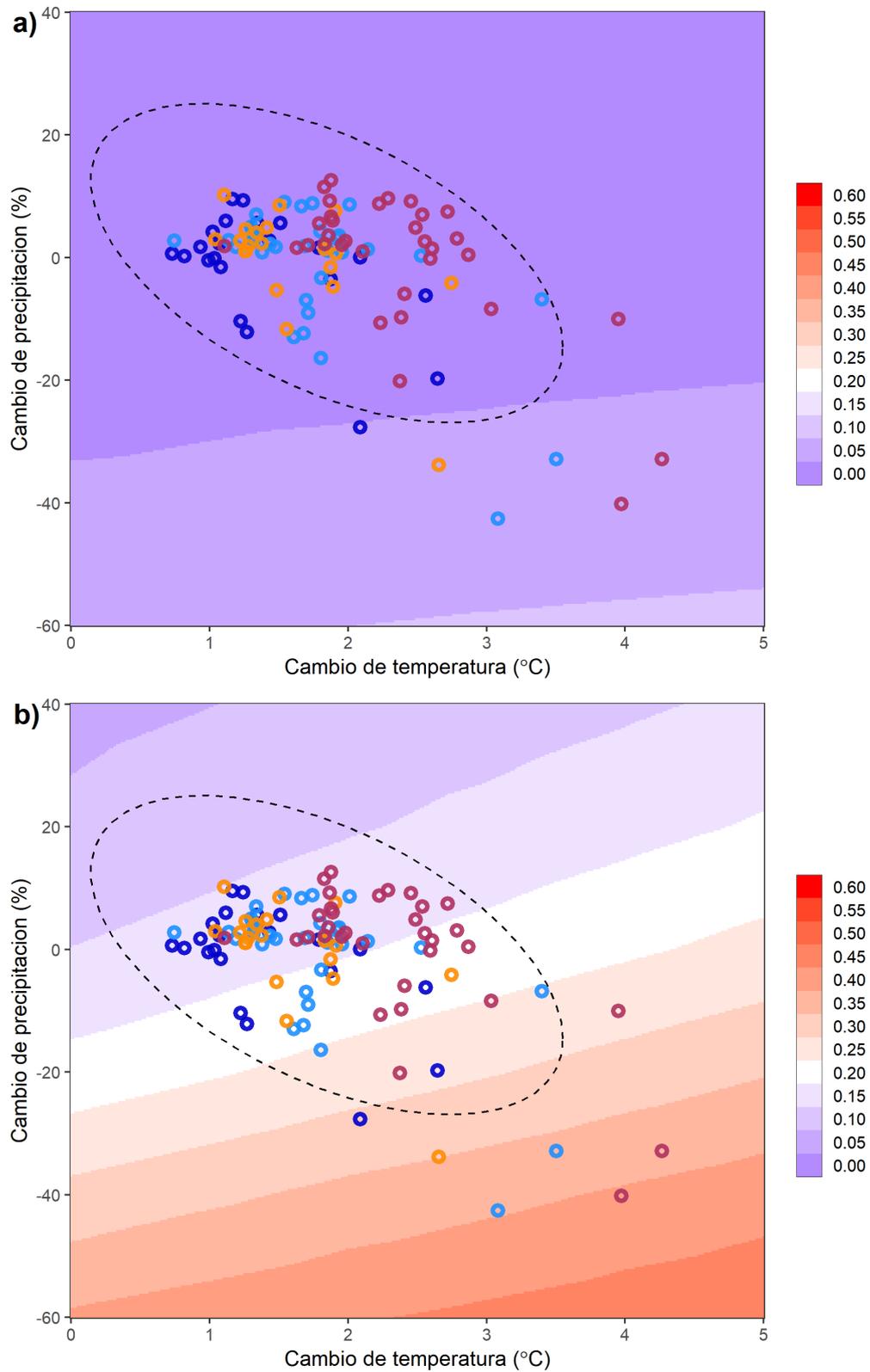


Figura 7.7 Superficies de Respuesta al Clima (SRC) de la vulnerabilidad para la demanda poblacional (a) y de riego (b). En ambas Figura s, los puntos superpuestos representan los cambios climáticos proyectados por los modelos-GCM del proyecto CMIP5. La elipse muestra el intervalo de confianza del 95% de las proyecciones para observar las probabilidades de cambios climáticos futuros.

Los indicadores de desempeño mostrados en las Figuras 7.6 y 7.7 están simulados adoptando la actual superficie de riego presente en la cuenca (RIEGO-BASE) y por tanto no evalúan las disminuciones potenciales del desempeño debido al incremento de la demanda de riego. En esta sección, se evalúa el desempeño del sistema considerando los desarrollos de superficie de riego planeados en la cuenca.

La Figura 7.8 muestra las SRC para el indicador de confiabilidad para la demanda poblacional bajo el desarrollo de irrigación de línea de base, y bajo los casos de expansión considerados en el estudio (Cuadro 7.1). Se observa que la confiabilidad de la demanda poblacional es insensible a los incrementos en la demanda de riego.

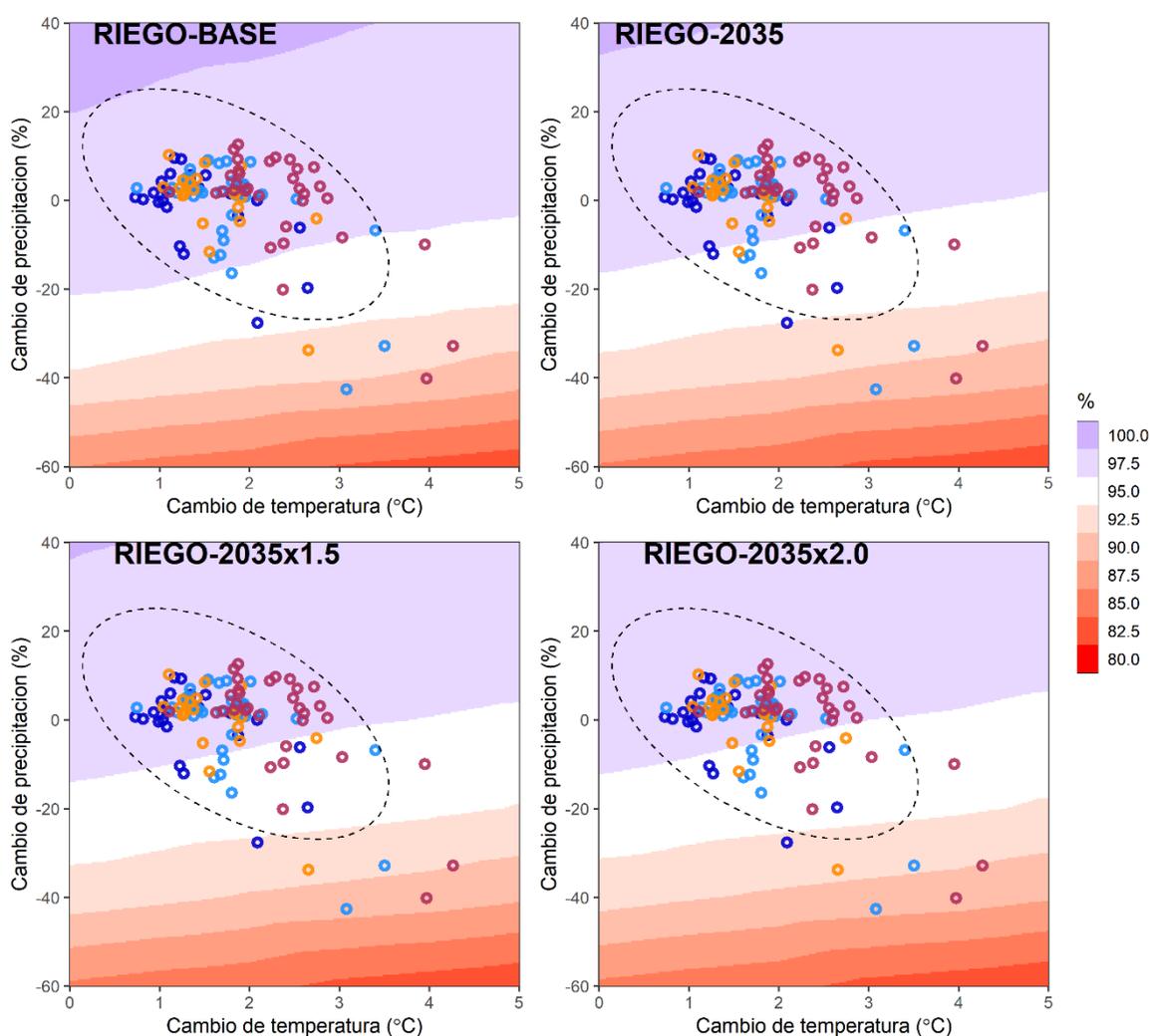


Figura 7.8 Superficies de Respuesta al Clima para la confiabilidad de la demanda poblacional bajo diferentes horizontes de desarrollo de la superficie de riego: a) Línea de base, b) Línea de base + expansiones proyectadas para 2035, c) Línea de base + expansiones de 2035 x 1.5, c) Línea de base + expansiones de 2035 x 2. Los puntos superpuestos en cada panel representan los cambios climáticos proyectados por los modelos-GCM del proyecto CMIP5. La elipse muestra el intervalo de confianza del 95% de las proyecciones para observar la probabilidad de futuros cambios climáticos.

De forma similar, la Figura 7.9 muestra las superficies en respuesta al clima para la confiabilidad para satisfacer la demanda de riego bajo diferentes horizontes de desarrollo agrícola en la cuenca. La confiabilidad del suministro de riego es más sensible al aumento del nivel de demanda en comparación con la confiabilidad de la demanda poblacional (Figure 7.8). Bajo la línea base, la confiabilidad varía desde 50% a 85% según la trayectoria climática, mientras que la expansión de la superficie de riego planeada para el horizonte 2035 haría que la confiabilidad se redujese entre el 40% y 75%, respectivamente. La confiabilidad cae aún más hasta valores del 35% y 65% bajo el escenario RIEGO-2035x1.5, y hasta el 30%-60% en el caso de RIEGO-2035x2.0. Estos resultados muestran que, independientemente de la dirección y la magnitud del cambio climático, se necesitan fuentes de suministro adicionales para satisfacer la demanda de las nuevas áreas de riego a fin de cumplir el objetivo de confiabilidad del 80%.

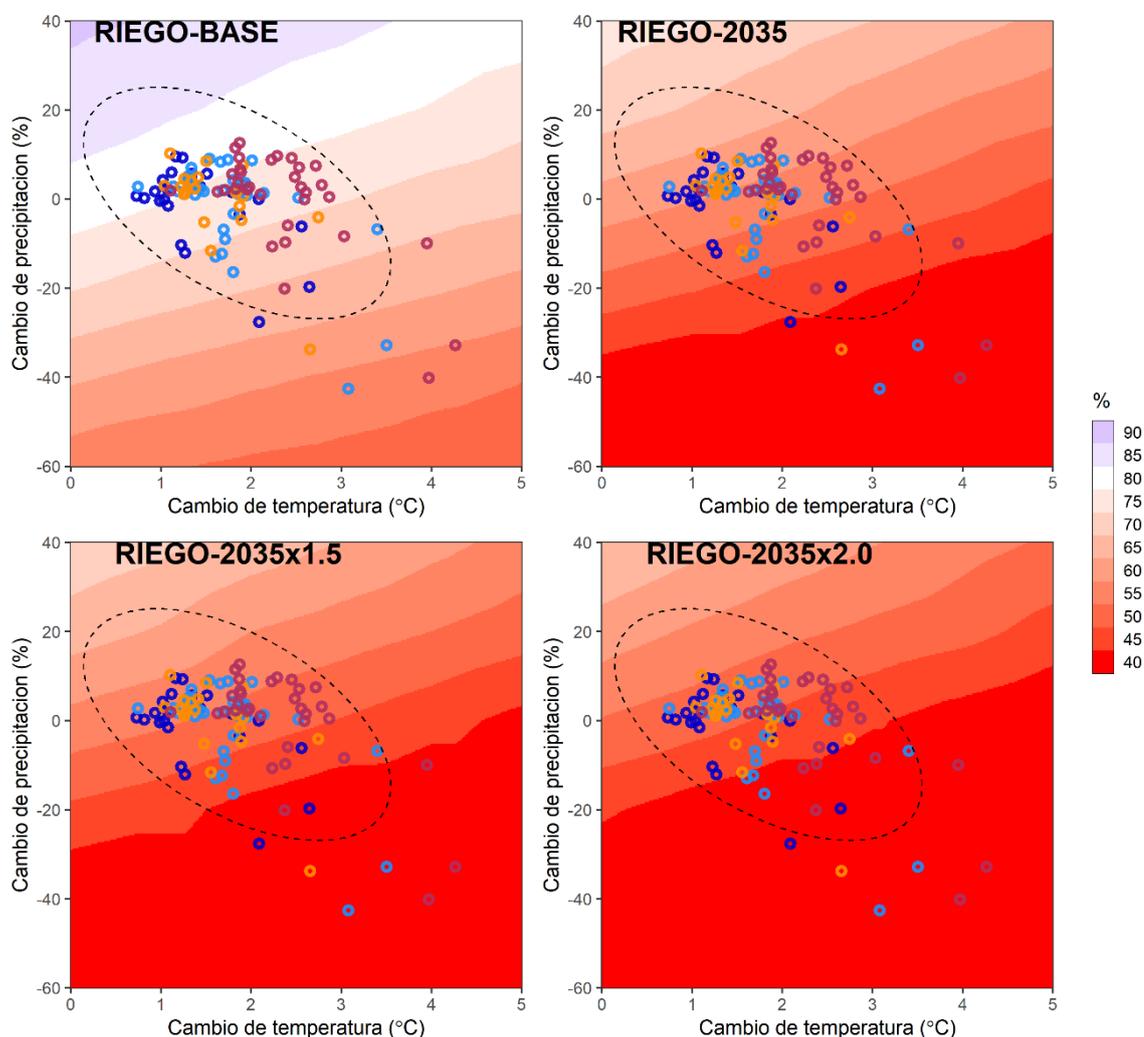


Figura 7.9 Superficies de Respuesta al Clima para la confiabilidad de la demanda de riego bajo diferentes horizontes de desarrollo de la superficie de riego: a) Línea de base, b) Línea de base + expansiones proyectadas para 2035, c) Línea de base + expansiones de 2035 x 1.5, c) Línea de base + expansiones de 2035 x 2. Los puntos superpuestos en cada panel representan los cambios climáticos proyectados por los modelos-GCM del proyecto CMIP5. La elipse muestra el intervalo de confianza del 95% de las proyecciones para observar la probabilidad de futuros cambios climáticos.

7.2.3 Riesgo de inundación

En la Fase III del DTF, se evalúa el riesgo de inundación en el sistema Chancay-Lambayeque en base al cálculo del período de retorno del caudal máximo diario simulado en la estación de aforos de Racarumi. Para este análisis, primero se identifica las fechas donde se han registrado los valores máximos de caudal diario para cada una de las 180 realizaciones climáticas. A cada conjunto de valores de caudal se ajusta la Distribución Generalizada de Valores Extremos y se calcula el periodo de retorno del caudal crítico de 300 m³/s.

La Figura 7.10 muestra la SRC del periodo de retorno para el caudal de descarga crítica. Los periodos de retorno calculados varían de aproximadamente 2.1 años para la trayectoria climática más húmeda (incremento del 40% en la precipitación media anual) hasta aproximadamente 10 años para la trayectoria más seca (disminución del -60% en la precipitación media). Si consideramos la variabilidad climática proyectada por los GCM y el rango de confianza del 99% para esta variabilidad (elipse en la Figura 7.10), el rango de valores para el período de retorno estaría entre 2,65 años y 9 años. Bajo condiciones actuales de precipitación (línea de base), y según los registros históricos de caudal, el periodo de retorno es de aproximadamente 4.2 años. Los resultados del análisis confirman que la recurrencia de eventos extremos es sensible a las condiciones climáticas proyectadas para el futuro.

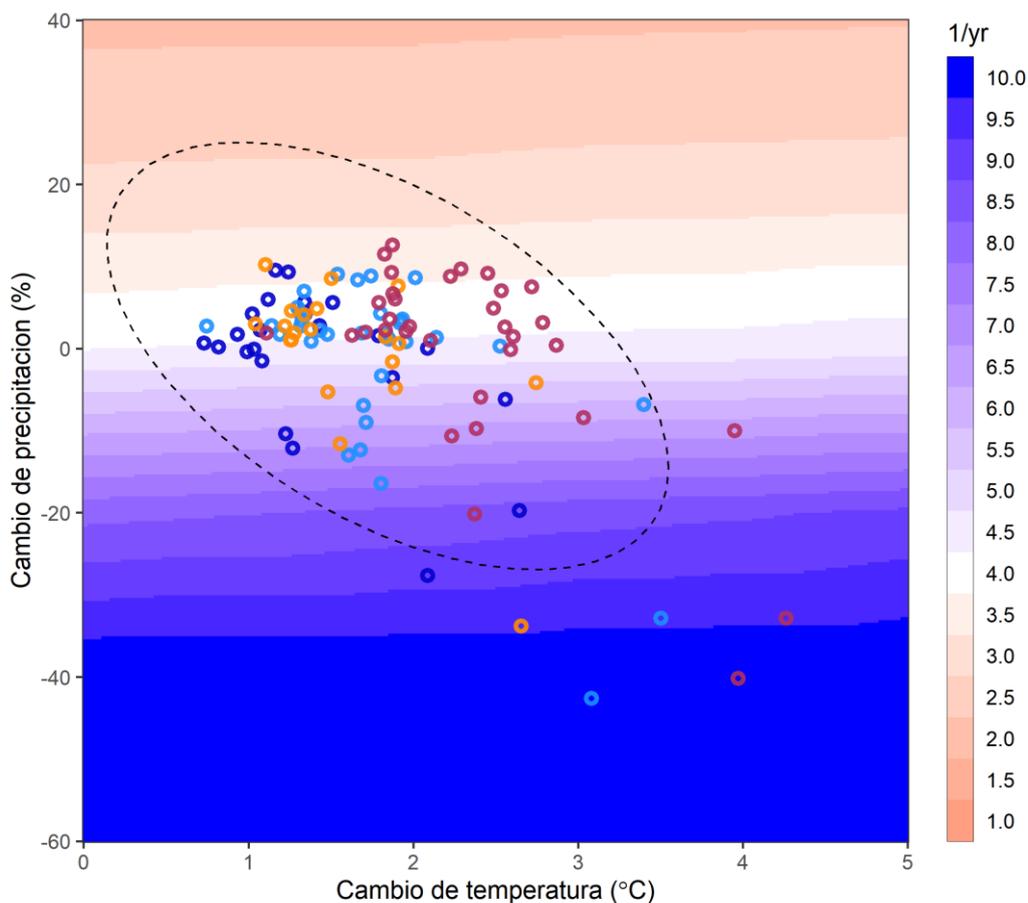


Figura 7.10 Superficies en respuesta al clima para el intervalo de retorno del nivel de descarga crítica de 300 m³/s en la estación Racarumi. Los puntos superpuestos en cada panel representan los cambios climáticos proyectados de los modelos CMIP5. La elipse muestra el intervalo de confianza del 95% de las proyecciones para observar la probabilidad de futuros cambios climáticos.

7.1.1 Análisis de robustez y resiliencia

En esta sección se evalúa los resultados de la Prueba de Estrés Climático mediante las medidas de robustez y resiliencia previamente definidas (ver sección 4.1.1). Estas dos medidas solo se calculan para los indicadores de demanda poblacional y de riego, y no para el periodo de retorno del caudal crítico de inundación en la estación de Racarumi ya que no se dispone de un umbral objetivo para este último caso. Las medidas de resiliencia y robustez se calculan para todas las trayectorias climáticas evaluadas y para cada uno de los cuatro niveles de demanda de riego (RIEGO-BASE, RIEGO-2035, RIEGO-2035x1.5 y RIEGO-x2.0). Al calcular la robustez y la resiliencia, ponderamos diferentes cambios climáticos en función de su plausibilidad con respecto a las proyecciones climáticas referidas en el proyecto CMIP5. Para este cálculo, consideramos dos horizontes de proyección climática: 2021-2050 (periodo centrado en el año 2035) y 2036-2065 (periodo centrado en el año 2050).

La Figura 7.11 muestra el índice de robustez calculado para el suministro de agua doméstica, con respecto a la confiabilidad del objetivo especificado del 95%. Para el año proyectado 2035, la robustez asociada la confiabilidad de la demanda poblacional es alta (> 0.97) para los escenarios de desarrollo RIEGO-BASE, RIEGO-2035, RIEGO-2035x1.5) e inferior a 0.9 para el escenario de RIEGO-2035x2.0. La robustez para la confiabilidad de la demanda poblacional es ligeramente inferior para la proyección realizada para el año 2050 con valores de robustez de > 0.9 para los escenarios RIEGO-BASE, RIEGO-2035, RIEGO-2035x1.5, y de 0.8 para el escenario de desarrollo más extremo (RIEGO-2035x2.0).

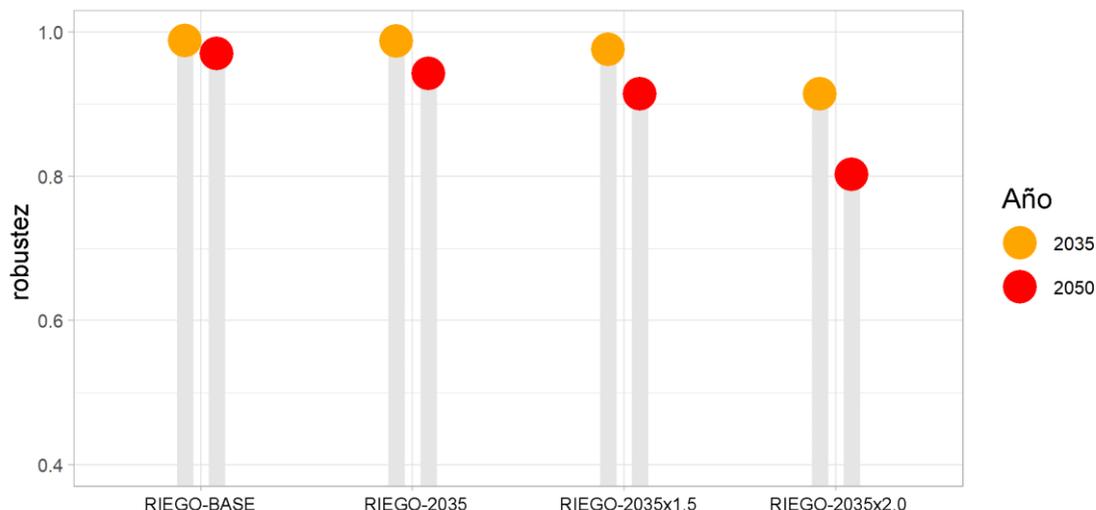


Figura 7.11 Robustez del suministro de agua doméstica con respecto al umbral de confiabilidad dado del 95% bajo los cuatro niveles de demanda de riego y dos años de proyección (2035 y 2050).

De manera similar, la Figura 7.12 muestra el índice de robustez calculado para el suministro de agua de riego. Para evaluar la robustez del suministro de riego, consideramos dos objetivos de confiabilidad adicionales del 50% y el 65%, además del objetivo definido por las partes interesadas en el primer taller (80%). Esto se hizo para ilustrar más claramente las diferencias asociadas a los diferentes escenarios de desarrollo evaluados para los años de proyección. Para un objetivo de confiabilidad del 50%, la robustez disminuye sustancialmente con el aumento de la demanda de riego, disminuyendo aproximadamente de 1 a 0,3 para el de proyección 2035, y de 1 a 0,2 para el 2050.

La robustez es cercana a 1 bajo el nivel actual de superficie regadas, pero disminuiría a aproximadamente 0 en los otros tres escenarios de expansión.

Para el objetivo real de confiabilidad del riego del 80%, la robustez es baja (0.15) por debajo del nivel de demanda de riego de línea base y 0 bajo los otros tres niveles de demanda. Estos resultados muestran que el suministro de agua para riego no es robusto al cambio climático si se mantiene las actuales infraestructuras existentes en la cuenca.

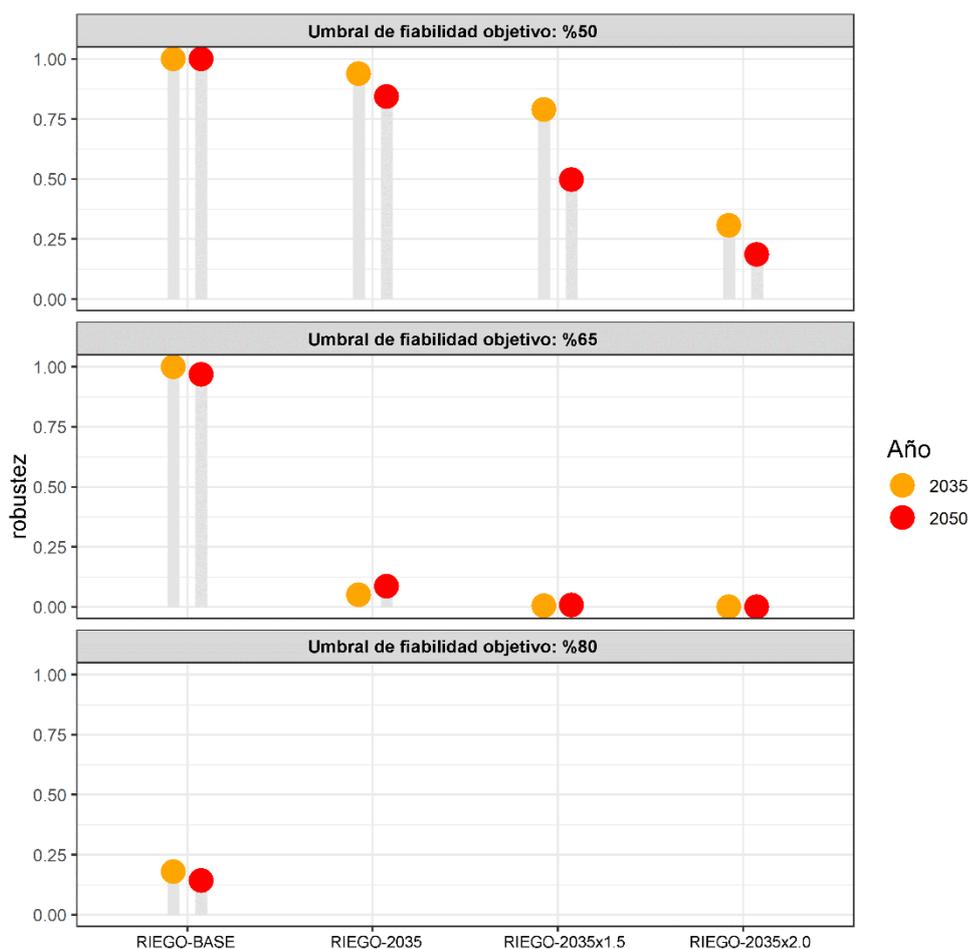


Figura 7.12 Robustez en la confiabilidad de la demanda de agua para riego bajo cuatro niveles o horizontes de desarrollo de la superficie regada, y dos años de proyección climática (2035 y 2050). Los paneles muestran el objetivo de confiabilidad utilizado para el cálculo de la robustez y son del 50% al 60%, el 60%, el 70% y el 80% respectivamente.

La Figura 7.13 muestra la medida de resiliencia para el suministro de la demanda de agua poblacional para los mismos años de proyección y los niveles-horizontes de demanda de riego. La resiliencia del sistema para recuperar la satisfacción de la demanda de agua poblacional se encuentra alrededor de 0,45 en todos los casos, lo que demuestra que la medida no es sensible al nivel de demanda de riego y al año de proyección futuro. De manera similar, la Figura 7.14 muestra la capacidad de recuperación del suministro de agua para riego en los mismos niveles de demanda y años de proyección. La capacidad de recuperación del sistema es de 0,42 en el nivel de la demanda de irrigación de referencia (RIEGO-BASE) y de 0,16 a 0,18 para los horizontes de expansión evaluados. La capacidad de recuperación del suministro de agua para satisfacer el riego también resultó ser insensible al año de proyección climática.

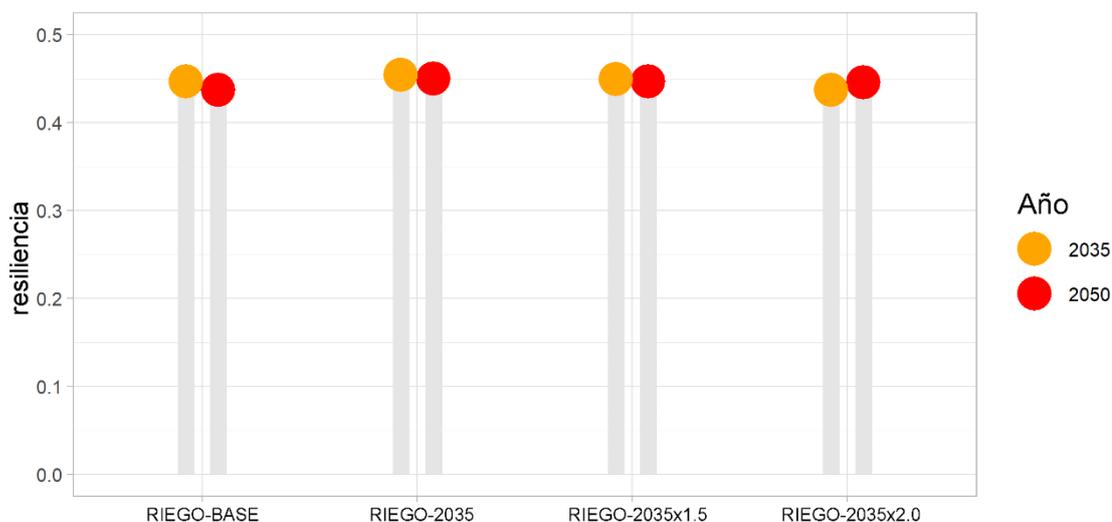


Figura 7.13 Capacidad de recuperación del sistema para satisfacer la demanda de agua poblacional en los cuatro niveles de demanda de riego y dos años de proyección climática (2035 y 2050)

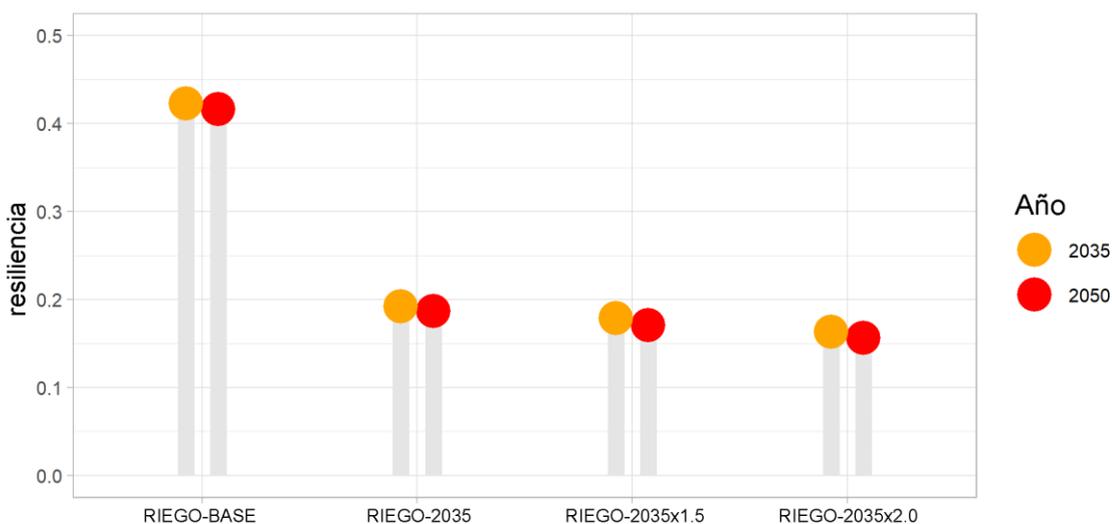


Figura 7.14 Capacidad de recuperación del sistema para satisfacer la demanda de agua de riego en los cuatro niveles de demanda de riego y dos años de proyección climática (2035 y 2050)

7.3 Síntesis

Se proporciona aquí una descripción general de la metodología empleada durante la Prueba de Estrés Climático, y los principales resultados y conclusiones derivadas del análisis. Para identificar las vulnerabilidades del sistema actual a las condiciones futuras, se ha evaluado el estrés del sistema considerando tres factores de incertidumbre climática (la variabilidad natural del clima, los cambios en la temperatura media, los cambios en la precipitación media) y factor no climático (cambios en el nivel de desarrollo de la superficie de riego).

Para realizar la prueba de estrés se combinaron: 1) el uso de un generador de clima, 2) un modelo hidrológico (HydroBID) que simula caudales a partir de las variables climáticas generadas, y 3) un modelo de evaluación y gestión del agua el modelo de asignación de agua (WEAP) para la asignación óptima de los recursos disponibles en los diferentes nodos de demanda de la cuenca, y la obtención de los indicadores de desempeño y garantía en la satisfacción de la demanda. Igualmente se hace una evaluación del impacto de la variabilidad climática en el periodo de retorno del caudal crítico de inundación de la cuenca. Todos los indicadores de desempeño son representados a través de Superficies de Respuesta al Clima (SRC), y se resumen los resultados en términos de la robustez y resiliencia del sistema frente a las proyecciones climáticas referidas por los GCMs para la región de estudio. A continuación, se resumen las principales conclusiones derivadas de la fase III.

Resultados sobre la respuesta hidrológica al cambio climático:

- El caudal medio diario en la estación de Racarumi es muy sensible a los cambios en la precipitación media anual y en menor medida a los cambios en la temperatura media anual.
- El caudal medio diario en la estación Racarumi osciló entre 13 y 50 m³/s a través del rango evaluado de cambios climáticos, mientras que el valor histórico durante el período 1970-2010 fue de 34,1 m³/s. Sobre la base de las proyecciones CMIP5 para 2050, el caudal medio diario es más probable que esté en el rango de 26 a 38 m³/s.
- El período de retorno del nivel crítico de descarga (300 m³/s) en la estación de Racarumi varía de 2.1 a 10 años bajo el cambio climático, en comparación con el período de retorno histórico de 4,2 años. Sobre la base de las proyecciones climáticas para 2050, es más probable que tenga un período de retorno de 2,65 a 9 años.

Resultados sobre el desempeño del suministro poblacional de agua:

- El suministro de agua poblacional es poco sensible al cambio climático debido a la alta prioridad dada en comparación con otros usos como el riego y la minería. El umbral de confiabilidad del 95% se satisface en la mayoría de las condiciones futuras, excepto cuando la precipitación media se reduce en un 35% o más. Sin embargo, es poco probable que se produzca una reducción de la precipitación tan acusada de acuerdo a las proyecciones climáticas para el año 2050.
- La vulnerabilidad del suministro de agua poblacional también es baja y es inferior a 0,1 en todos los escenarios climáticos evaluados.
- La robustez del sistema para satisfacer la demanda de agua poblacional es muy alta para un amplio rango de condiciones climáticas futuras, esto superior a 0.97 para el horizonte 2035, y por encima de 0.90 para el horizonte 2050.
- La resiliencia del sistema para satisfacer la demanda poblacional se estima alrededor de 0.45 para el horizonte climático 2035, y de 0.42 para el horizonte 2050. Se observa que el indicador de resiliencia no es sensible a los escenarios de cambio de demanda de agua de riego analizados (RIEGO-BASE, RIEGO-2035, etc.)

Resultados sobre el desempeño del suministro de agua de riego:

- La confiabilidad para satisfacer la demanda de riego varía del 50 al 90% en el nivel de desarrollo de referencia y del 40 al 70 % en el nivel de demanda de 2035. Nuestro análisis muestra que el umbral objetivo del 80% establecido para la demanda de riego sólo puede cumplirse para el nivel de demanda de referencia y solo bajo una estrecha gama de escenarios climáticos húmedos. En ninguno de los casos el umbral objetivo se consigue para el escenario de demanda planificado para el 2035.
- La vulnerabilidad del riego también es relativamente alta en comparación con el suministro de agua doméstica, que oscila entre 0,05 y 0,45 en el nivel de desarrollo de riego (actual). Según las proyecciones climáticas para 2050, es más probable que se produzca un rango de vulnerabilidad de 0,1 a 0,3 para los mismos niveles de demanda.
- La robustez del sistema para satisfacer la demanda de agua de riego es muy sensible al objetivo de confiabilidad especificado. Para el objetivo umbral del 80% marcado por los usuarios, la robustez es 0.15 para el nivel de desarrollo de riego actual (RIEGO-BASE), y de 0.0 para el horizonte de desarrollo de riego de 2035 (RIEGO-2035). Esto significa que es muy improbable que el sistema de riego alcance el umbral objetivo deseable. Sin embargo el sistema es más robusto (>0.9) cuando el umbral se baja desde el 80% al 65% (o menos).
- La resiliencia del Sistema para satisfacer la demanda de riego se estima alrededor del 0.42 para el actual nivel de desarrollo (RIEGO-BASE), pero sustancialmente más bajo para el escenario de crecimiento del riego planificado para el horizonte 2035 (RIEGO-2035). Se ha observado que los valores de resiliencia no son sensibles a los escenarios climáticos evaluados (los resultados son muy similares para los horizontes climáticos centrados en 2035 y 2050).

Como conclusión general del capítulo 7 se confirma que el actual sistema de infraestructura y gestión del agua en la cuenca de Chancay-Lambayeque no es robusto ni resistente al cambio climático, especialmente en lo que respecta a las garantías para la satisfacción de la demanda de agua de riego.

8 Fase IV: Gestión del Riesgo Climático

8.1 Visión general

La aplicación de la Prueba de Estrés Climático sobre el sistema Chancay-Lambayeque (Sección 7) demostró que la actual configuración de infraestructuras (infraestructura de línea de base) es vulnerable a las incertidumbres futuras, por lo que se requiere adaptarla para mejorar la robustez y resiliencia del sistema. En esta sección, consideramos varias intervenciones y carteras de inversión a nivel de cuenca y evaluamos su eficiencia para mejorar la garantía en el suministro de agua para riego y uso poblacional, y para reducir los riesgos de inundación en el valle. Estas intervenciones incluyen las cuatro opciones de inversión anteriormente presentadas en la sección 4.1.3, basado en las recomendaciones de los interesados. En el Cuadro 8.1 se resume las ocho opciones de intervención evaluadas en el presente estudio (cuatro proyectos de intervención aislados más cuatro portafolios).

Cuadro 8.1 Intervenciones, portafolios de intervención y costos asociados considerados para el sistema Chancay-Lambayeque junto con su costo total

Opción	Definición	Acrónimo	Capacidad (MMC)	Estimación de costo (Mil. US\$)
1	Infraestructura Natural	IN	24.000 ha	71
2	Incremento del uso de Agua Subterránea	AS	150	30
3	Presa La Montería	MO	70	168
4	Presa Sican	SI	80	158
5	Presa La Montería + Incremento del uso de Agua Subterránea	MO-AS	220	198
6	Presa Sican + Incremento del uso de Agua Subterránea	SI-AS	230	188
7	Presa La Montería + Presa Sican	MO-SI	150	326
8	Presa La Montería + Presa Sican + Incremento del uso de Agua Subterránea	MO-SI-AS	300	356

El análisis de las opciones de intervención se lleva a cabo utilizando la misma metodología presentada en la sección 7. Para la evaluación de los proyectos de IN se simuló con el modelo HydroBID el impacto hidrológico de los cambios de cubierta vegetal sobre el caudal de la cuenca. Los caudales simulados en diferentes secciones de la red de drenaje son entonces utilizados como variables de entrada en el modelo de asignación WEAP.

Para la evaluación del resto de intervenciones, el modelo WEAP se adaptó y actualizó convenientemente para incluir los elementos y características de las nuevas infraestructuras. Finalmente se ha explorado el potencial de las presas de Sican y La Montería para reducir el periodo de retorno de los diferentes niveles de alerta de inundación establecidos para la cuenca.

8.2 Indicadores de desempeño para las opciones de intervención

8.2.1 Infraestructura Natural (IN)

La propuesta de Intervención Natural considerada en este trabajo incluye actuaciones de manejo sostenible de la cobertura vegetal, y de reforestación y restauración de áreas degradadas. Las actuaciones tomadas en consideración para su análisis se concentran en aquellas cuencas en donde se consiguen los mayores ratios coste-efectividad, siendo la efectividad evaluada en términos de aumento de los caudales durante el periodo de estiaje (junio-septiembre). En general, los cambios de cobertura y de manejo sostenible asociados a los proyectos de IN tendrían impactos en la hidrología local a través del aumento de la infiltración y la reducción de los volúmenes de escorrentía superficial. Estos efectos se han simulado en el modelo HydroBID mediante la reducción de los valores del Número de Curva de las superficies actuadas y las subcuencas correspondientes. En el Apéndice A7 se ofrece una descripción detallada de la metodología empleada y de las actuaciones contempladas para la opción IN.

Las curvas de frecuencia de caudal obtenidas a partir de los 50 eventos con mayor caudal simulado se han obtenido para evaluar el impacto que la opción IN representa en términos de reducción de la vulnerabilidad frente al riesgo de inundación bajo diferentes escenarios plausibles de cambio climático (Figura 8.1). Las curvas, que fueron extraídas en seis secciones o puntos de descarga de la cuenca (subcuencas de Carhuaquero, La Montería, Racarumi, Río Chancay, Río Maychil, and Tinajones), demuestran que IN no representa una mejora notable respecto de la situación simulada con las condiciones de base actuales en las subcuencas de La Montaria, Rio Maychil, and Tinajones , y solo se observa una pequeña reducción del 1-2% del caudal en los eventos extremos en las subcuencas de Carhuaquero, Racarumi and Rio Chancay.

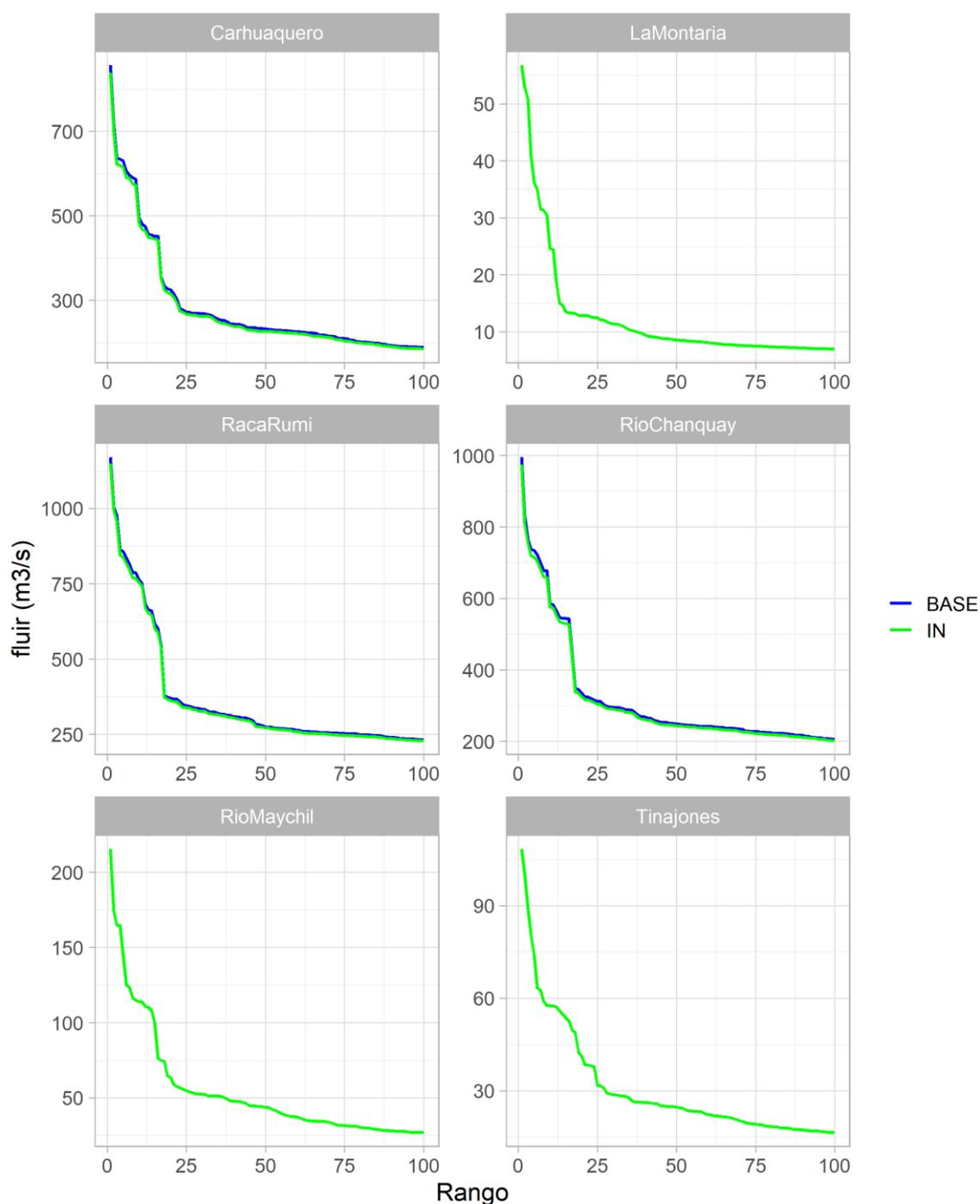


Figura 8.1 Curvas de frecuencia de caudal a partir de los 50 eventos de mayor caudal simulados para la línea de base (no intervención) y bajo la opción IN, en diferentes secciones o puntos de descarga de la cuenca (subcuencas de Carhuaquero, La Montería, Racarumi, Rio Chancay, Rio Maychil y Tinajones). La localización de los puntos de descarga se representa en la Figura A5.6.

Igualmente se ha estimado el periodo de retorno del caudal crítico de $300 m^3/s$ con la opción IN (Cuadro 8.2) y bajo diferentes escenarios de reducción de la precipitación. La metodología empleada para el cálculo del periodo de retorno es la misma que la empleada en la sección 7.

Los resultados demuestran una pequeña reducción de la recurrencia de eventos extremos cuando se adopta la opción IN en comparación con la línea de no intervención (cobertura actual). Bajo un escenario con una condición climática similar a la trayectoria histórica (no cambio en la precipitación media anual), el periodo de retorno pasa de 4.2 (sin IN) a 4.4 años (con IN). Para un escenario muy seco (reducción de la precipitación media anual del 60%) el periodo de retorno cambia desde 32.4 hasta 34.2, mientras que para un escenario muy húmedo (aumento del 40% de precipitación respecto del histórico) el periodo de retorno pasa de 2.1 a 2.2.

Cuadro 8.2 Valores del periodo de retorno para el nivel de caudal crítico (>300 m³/s) en el punto de descarga de Racarumi simulado bajo las condiciones de cobertura actual (línea de base), y el escenario de manejo sostenible y restauración de la cobertura vegetal (IN). Los resultados se muestran para diferentes realizaciones climáticas que representan cambios en la precipitación promedio anual entre el -60% y el 40% respecto del registro histórico.

Cambio de precipitación (%)	Periodo de retorno Cobertura actual (años)	Periodo de retorno Infraestructura Natural (años)
-60	34.1	36.5
-40	32.4	34.2
-20	8.1	8.7
0	4.2	4.4
+20	2.8	2.9
+40	2.1	2.2

En general se concluye que la opción IN solo proporciona un pequeño beneficio en términos de reducción de la recurrencia de eventos extremos de caudal, de entre el 3 y el 7% respecto de la situación actual dependiendo del escenario climático considerado. Sin embargo, los cambios en las curvas de frecuencia de caudales no son significativos y en consecuencia no se observó un beneficio neto de la IN en términos de satisfacción de la demanda de agua en la cuenca.

8.2.2 Incremento del uso de agua subterránea (AS)

Para el sistema Chancay-Lambayeque, la intervención AS tiene como objetivo reducir los déficits de abastecimiento de agua para las nuevas expansiones de irrigación planificadas para el horizonte 2035, proporcionando un aumento del volumen de agua explotable de aproximadamente 150 MMC por año.

La opción AS proporciona una ligera mejora de la confiabilidad en el abastecimiento poblacional a lo largo del rango de cambios climáticos proyectados por los modelos GCM (Figura 8.3), y una mejora notable para satisfacer la demanda de riego. De igual manera, la Figura 8.4 muestra las Superficies de Respuesta Climática para el abastecimiento de irrigación. Los resultados muestran que con la intervención AS, la confiabilidad del abastecimiento de irrigación mostró una mejora notable bajo todos los posibles cambios climáticos. Sin embargo, una confiabilidad objetivo del 80% sigue sin poder cumplirse aparte bajo una pequeña fracción de escenarios (es decir, cambio en la precipitación = 40%, cambio en la temperatura = 0°C).

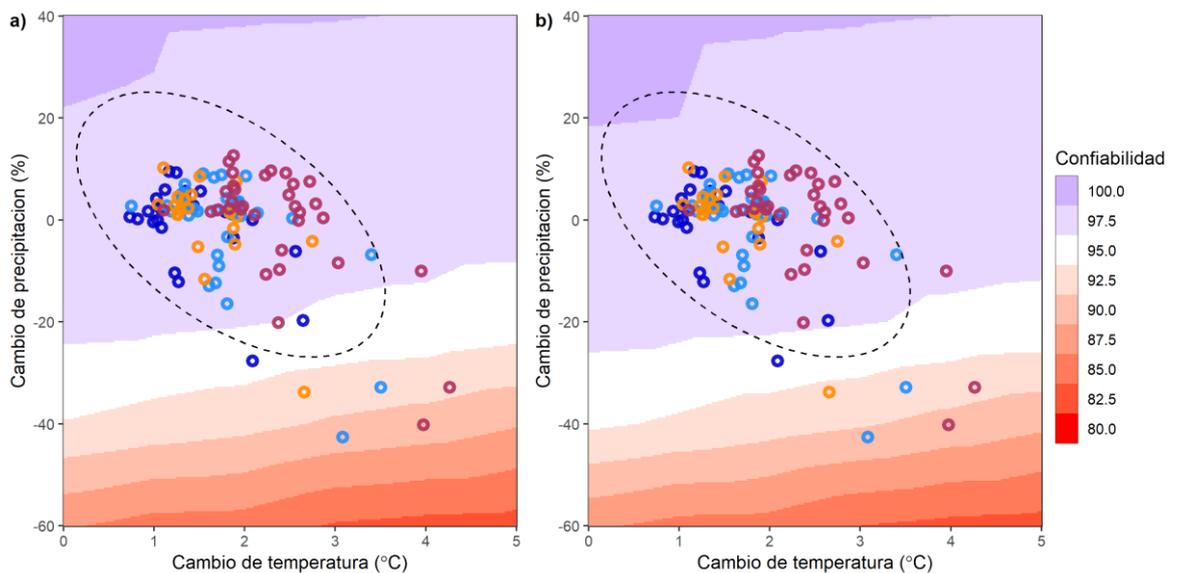


Figura 8.3 Superficies de respuesta climática para la confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua poblacional bajo a) sistema de línea de base (infraestructura actual), b) opción AS. Los resultados muestran las condiciones bajo los niveles de demanda de riego previstos para el horizonte 2035. Los puntos superpuestos en cada panel representan los cambios climáticos proyectados por los modelos GCM del proyecto CMIP5.

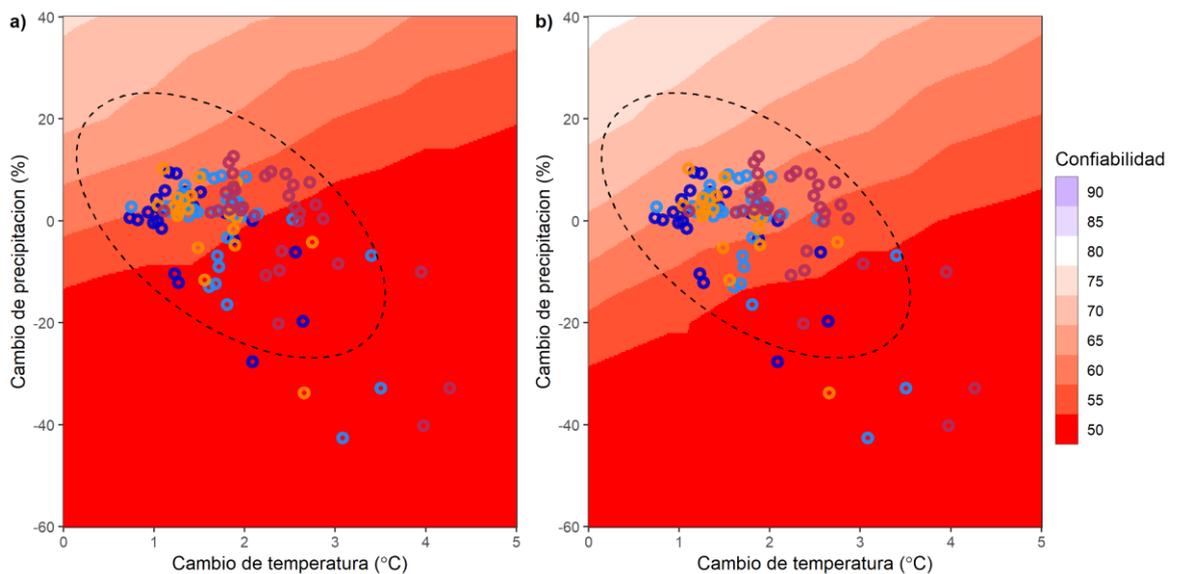


Figura 8.4 Superficies de respuesta climática para la confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua de riego bajo a) sistema de línea de base (infraestructura actual), b) opción AS. Los resultados muestran las condiciones bajo los niveles de demanda de riego previstos para el horizonte 2035. Los puntos superpuestos en cada panel representan los cambios climáticos proyectados por los modelos GCM del proyecto CMIP5.

8.2.3 Presa Sican (SI)

La tercera opción de intervención probada es la Presa Sican (SI) con una capacidad de almacenamiento planificada total de 130 MMC. El caudal afluente para la Presa Sican es desviada del caudal de Tinajones, el único reservorio existente en el sistema. Las ganancias de SI son mínimas sobre las condiciones de infraestructura de línea de base, tanto en términos de fiabilidad de suministro doméstico (Figura 8.5) como de fiabilidad de abastecimiento de irrigación (Figura 8.6), las cuales no son fáciles de ver de las superficies de respuesta climática.

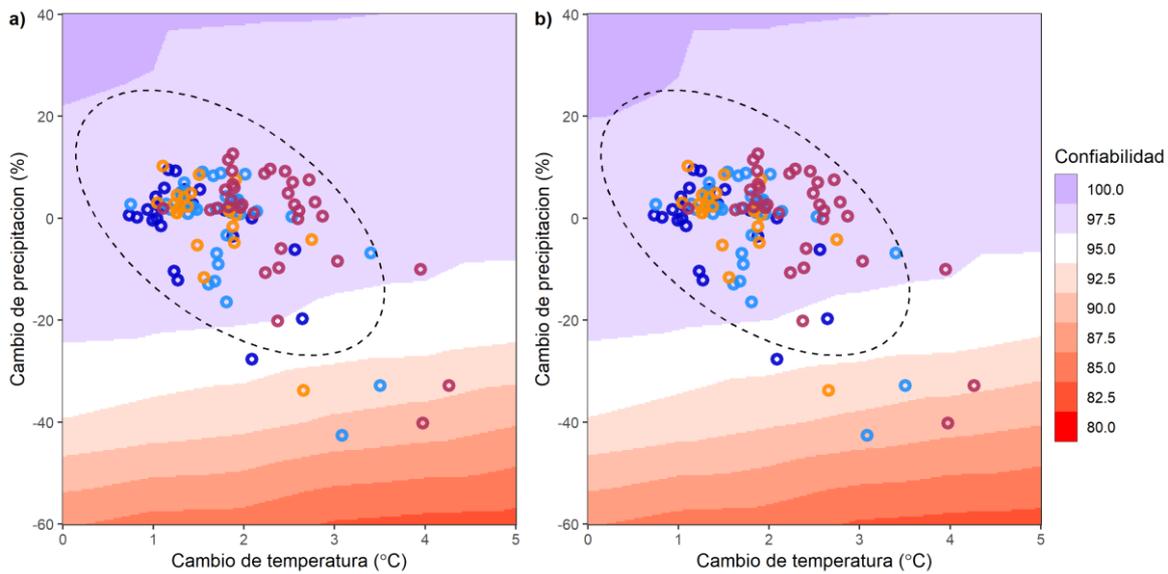


Figura 8.5 Superficies de respuesta climática para la confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua de poblacional bajo a) sistema de línea de base (infraestructura actual), b) opción SI. Los resultados muestran las condiciones bajo los niveles de demanda de riego previstos para el horizonte 2035.

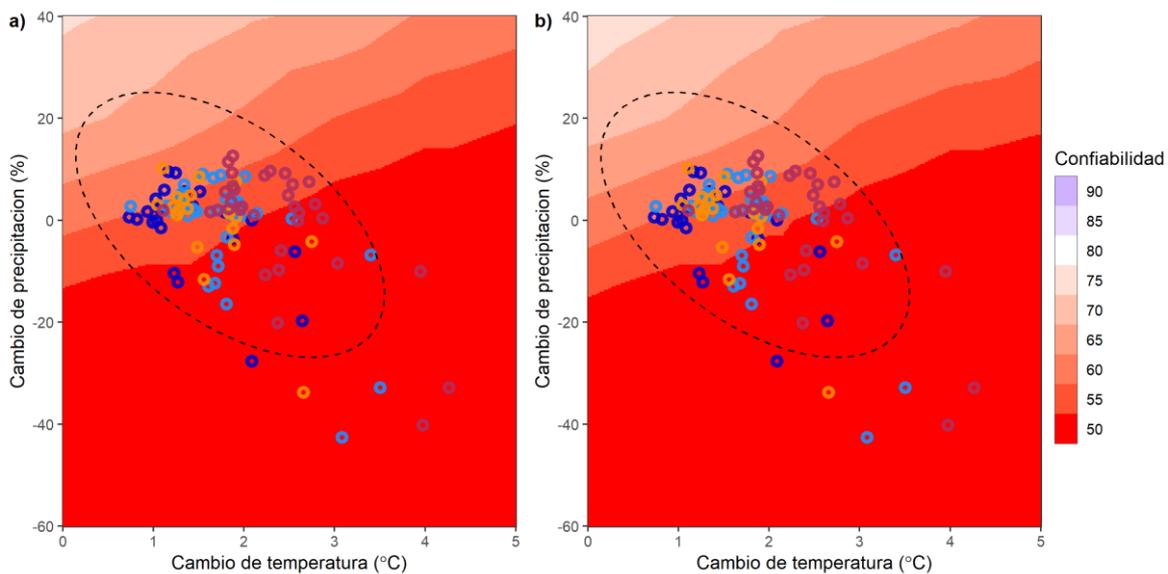


Figura 8.6 Superficies de respuesta climática para la confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua de riego bajo a) sistema de línea de base (infraestructura actual), b) opción SI. Los resultados muestran las condiciones bajo los niveles de demanda de riego previstos para el horizonte 2035.

8.2.4 Presa La Montería (MO)

La Presa La Montería (MO) es la cuarta opción de intervención evaluada para esta sección, con una capacidad de almacenamiento total de 70 MMC, y con casi la mitad del costo de SI (65 millones de dólares). Se ubica en el Río Tablazo, en la parte central de la cuenca. Las superficies de respuesta climática en la Figura 8.7, y la Figura 8.8 compara la fiabilidad del sistema bajo la infraestructura de línea de base y la intervención MO. Encontramos que las ganancias de rendimiento de MO también son relativamente bajas y son comparables con las mostradas para la Presa Sican anteriormente.

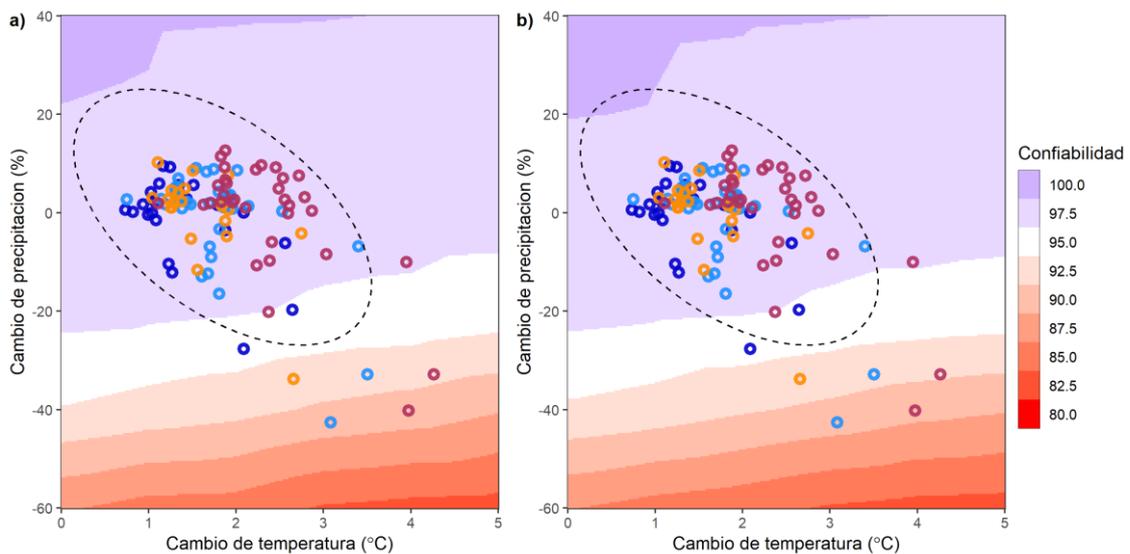


Figura 8.7 Superficies de respuesta climática para la confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua de poblacional bajo a) sistema de línea de base, b) opción MO. Los resultados muestran las condiciones bajo los niveles de demanda de riego previstos para el horizonte 2035.

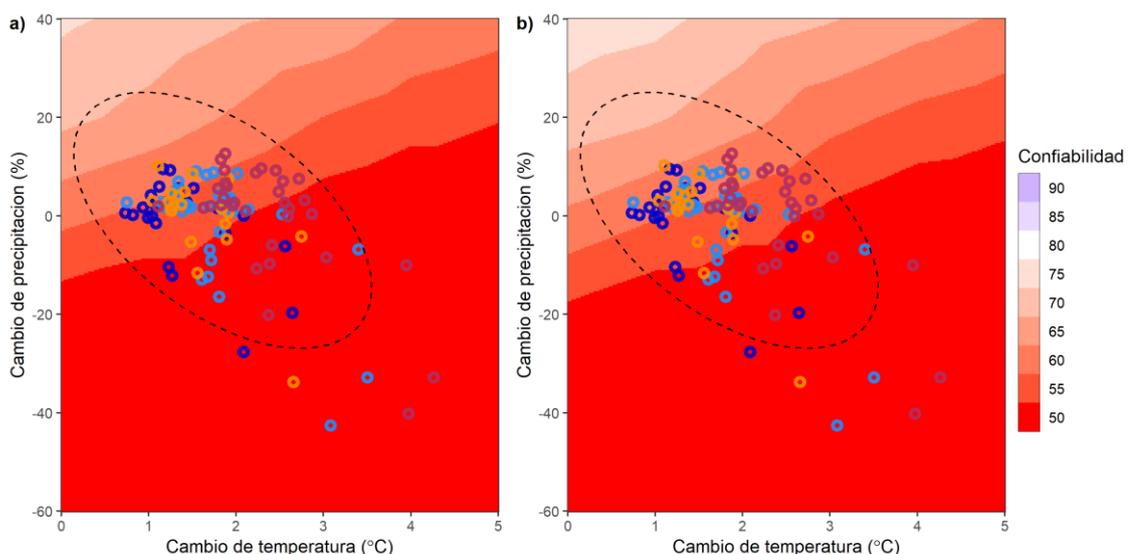


Figura 8.8 Superficies de respuesta climática para la confiabilidad en la satisfacción de la demanda de agua de riego bajo a) sistema de línea de base, b) opción MO. Los resultados muestran las condiciones bajo los niveles de demanda de riego previstos para el horizonte 2035.

8.3 Impacto de Sican y La Montería sobre el riesgo de inundaciones

El aumento de la capacidad de almacenamiento en la cuenca a través de la construcción de las presas de Sicán y La Montería podría contribuir a reducir el riesgo de inundaciones en el Valle. Durante un evento o un periodo de caudales extremos, y siempre que exista suficiente capacidad de almacenamiento disponible, se podría derivar parte del flujo circulante por el río Chancay a los embalses del sistema. En este análisis se explora el impacto potencial de estas infraestructuras para la reducción del riesgo de inundaciones bajo diferentes escenarios climáticos.

Como primer paso del análisis, se ha analizado la dinámica mensual de almacenamiento de agua simulada con el modelo WEAP en los embalses para tener una mejor aproximación a la capacidad de almacenamiento medio que los embalses tienen a lo largo del año para poder laminar avenidas. El análisis se ha realizado de manera independiente considerando ambas infraestructuras por separado.

En el Cuadro 8.3 se muestra para cada uno de los reservorios analizados la probabilidad de que se supere un nivel de llenado, expresado este último en relación con la capacidad máxima de almacenamiento. De análisis se deduce que la probabilidad de que Sicán alcance su máxima capacidad es relativamente pequeña al no alcanzarse el máximo almacenable durante al menos el 99% del periodo simulado. Sin embargo, este hecho se explica parcialmente por la reducida capacidad de transporte del canal de alimentación del embalse (7 m³/s) especialmente cuando se compara con la del canal de alimentación a Tinajones (58 m³/s). Se concluye que la capacidad de almacenamiento de Sican es lo suficientemente grande para amortiguar eventos extremos, si bien para maximizar su potencial de amortiguación convendría hacer una operación conjunta con el reservorio de Tinajones.

Para el caso del reservorio de La Montería, este se encuentra alrededor del 5% del tiempo a su máxima capacidad, momentos que normalmente coinciden con el periodo de mayor probabilidad de inundación. Este hecho a considerar la modificación de las reglas de operación del embalse con el objeto de garantizar un volumen suficiente de vacío que permita amortiguar los caudales extremos y evitar reducir el riesgo de inundación durante las épocas lluviosas.

Cuadro 8.3 Porcentaje del tiempo en que los embalses están por encima del nivel de llenado indicado (expresado como porcentaje sobre su capacidad máxima)

Porcentaje de excedencia	Seco		Medio		Húmedo	
	SI	MO	SI	MO	SI	MO
1%	88%	100%	91%	100%	91%	100%
5%	81%	98%	90%	100%	91%	100%
10%	61%	89%	86%	97%	91%	89%
25%	46%	66%	72%	81%	85%	65%
50%	24%	50%	59%	58%	75%	53%

A continuación, se ha analizado el impacto de la construcción de las intervenciones sobre el riesgo de inundación, en términos de periodos de retorno de los niveles de alerta. Para el análisis se asume que existe capacidad de almacenamiento suficiente para laminar los periodos de caudales altos, bien porque el embalse no está a plenamente lleno (caso del embalse de Sicán) o porque las reglas de operación del embalse permitirían un nivel de llenado optimo (caso del embalse de La Montería). Los valores máximos de caudal circulante por los canales de alimentación de Sican y La Monteria son de 7 y 20 m³/s.

En el Cuadro 8.4 se muestran los periodos de retorno para los tres niveles de alerta y los diferentes escenarios simulados (1) línea de base (no intervención), (2) Sicán, y (3) La Montería. Como se observa, los periodos de retorno se ven débilmente modificados respecto de los valores de la línea de base. En cualquier caso, y como es de esperar, la presa de La Monteria sería más efectiva a la hora de reducir la frecuencia de eventos extremos en comparación con La Presa de Sican debido a que el caudal máximo circulante por el canal de alimentación es superior.

Cuadro 8.4 Periodos de retorno de caudales extremos diarios para diferentes niveles de alerta de inundación, y condiciones y escenarios climáticos.

Condición climática	Opción de intervención	Amarilla (150 m ³ /s)	Naranja (200 m ³ /s)	Roja (300 m ³ /s)
Seco	BASE	5.2	8	15.7
	La Montería	6.7	10	18.9
	Sican	5.6	8.5	16.6
Medio	BASE	1.6	2.2	3.9
	La Montería	1.8	2.5	4.4
	Sican	1.7	2.3	4.1
Húmedo	BASE	1.2	1.4	2.0
	La Montería	1.2	1.5	2.2
	Sican	1.2	1.4	2.1

La conclusión general es que las opciones SI y MO no reducen significativamente el riesgo de inundación, o su impacto es relativamente bajo, debido a la capacidad limitada del caudal que pueda pasar por los canales de alimentación. En cualquier caso, ha de advertirse que esta conclusión ha de tomarse con precaución pues está basada en un análisis simple de carácter cualitativo. Se necesita realizar un estudio específico de más detalle (por ejemplo, simulando los caudales en las secciones donde se localizan los canales de alimentación de las presas) para demostrar de forma precisa esta conclusión.

8.4 Comparación del desempeño de las opciones de intervención y portafolios

Para evaluar las ganancias netas de desempeño de todas las ocho adaptaciones posibles se utilizan los indicadores de resiliencia y robustez, así como los de confiabilidad promedio y vulnerabilidad (Cuadro 8.5).

No se incluye en el análisis los indicadores de desempeño empleados para el análisis del riesgo de inundación (periodo de retorno del caudal crítico en Racarumi) pues, como se ha sugerido en apartados anteriores al menos de manera semi-cuantitativa, no existen cambios significativos en la reducción del riesgo en comparación con los valores simulados para la línea de base.

El Cuadro 8.5 compara los valores de los indicadores de desempeño para la demanda poblacional bajo la línea de base (realización climática representativa del histórico) y las ocho opciones de intervención evaluadas. Los resultados están obtenidos para un escenario de demanda de riego igual al actual (RIEGO-BASE). En general, no se observan grandes aumentos en el desempeño del sistema, ya de por sí muy alto para la situación de base debido a la prioridad que se da al abastecimiento poblacional sobre el resto de las demandas, para las ocho opciones consideradas. Se observa una ligera disminución de la resiliencia (de 0.54 a 0.48) para la opción SI y el portafolio SI-AS.

Cuadro 8.5 Resumen de los indicadores de desempeño para la demanda poblacional doméstico según situación actual (línea de base) y los ocho portafolios de actuación. Los resultados se muestran por separado para los niveles de desarrollo de riego actual

Opciones	Confiabilidad media	Robustez (obj: 95%)	Resiliencia	Vulnerabilidad
BASE	● 97.9	● 1.0	● 0.54	● 0.010
IN	● 97.9	● 1.0	● 0.53	● 0.010
AS	● 97.9	● 1.0	● 0.54	● 0.010
MO	● 98.0	● 1.0	● 0.56	● 0.009
SI	● 97.8	● 1.0	● 0.48	● 0.009
MO-AS	● 98.0	● 1.0	● 0.56	● 0.009
SI-AS	● 97.8	● 1.0	● 0.48	● 0.009
SI-MO	● 98.0	● 1.0	● 0.56	● 0.009
SI-MO-AS	● 98.0	● 1.0	● 0.56	● 0.008

El Cuadro 8.6 compara los valores de los indicadores de desempeño para la demanda poblacional bajo la línea de base y las ocho opciones de intervención evaluadas para el escenario de demanda de riego planificado para el horizonte 2035 (RIEGO-2035). De forma similar a los resultados encontrados para el escenario RIEGO-BASE, no se observaron diferencias significativas para los indicadores de confiabilidad, robustez y vulnerabilidad, pero si un empeoramiento de la resiliencia del sistema para la opción SI y el portafolio SI-AS.

Cuadro 8.6 Resumen de los indicadores de desempeño para la demanda poblacional según situación actual (línea de base) y los ocho portafolios de actuación. Los resultados se muestran por separado para los niveles de desarrollo planificado para el horizonte 2035.

Opciones	Confiabilidad media	Robustez (obj: 95%)	Resiliencia	Vulnerabilidad
BASE	● 97.5	● 1.0	● 0.53	● 0.012
IN	● 97.5	● 1.0	● 0.53	● 0.012
AS	● 97.6	● 1.0	● 0.51	● 0.010
MO	● 97.5	● 1.0	● 0.54	● 0.011
SI	● 97.4	● 1.0	● 0.46	● 0.012
MO-AS	● 97.6	● 1.0	● 0.53	● 0.010
SI-AS	● 97.5	● 1.0	● 0.47	● 0.011
SI-MO	● 97.5	● 1.0	● 0.54	● 0.011
SI-MO-AS	● 97.6	● 1.0	● 0.54	● 0.010

Cuadro 8.7 compara los resultados de los indicadores de desempeño para la demanda de agua de riego. Bajo el nivel actual de desarrollo del riego (RIEGO-BASE), el desempeño de las diferentes opciones es muy similar en términos de confiabilidad y robustez promedio (para los objetivos del 60 y 70%). Para el caso de los indicadores de resiliencia y vulnerabilidad se muestra una ligera mejora para todas las opciones. Los portafolios SI-MO y SI-MO-AS se muestran más robustos para el objetivo de 80%.

Para el escenario de desarrollo agrario planificado para el horizonte 2035 (RIEGO- 2035), los indicadores de desempeño son sustancialmente más bajos para todas las opciones (Cuadro 8.8). Los portafolios MO-AS y SI-MO-AS superan a las demás opciones en relación al promedio de confiabilidad y robustez para un umbral objetivo del 60%, observándose incluso un efecto sinergia entre las opciones MO y AS que hace que se alcance valores de robustez del 0.8 (por separado las opciones AS y MO ofrecen valores de robustez de 0.3 y 0.1, respectivamente). No obstante, se observa que ninguna de las opciones es robusta bajo los objetivos de confiabilidad del 70 y 80%.

Cuadro 8.7 Resumen de los indicadores de desempeño para la satisfacción de la demanda de riego para la infraestructura de línea de base y las ocho opciones/portafolios analizados. Los resultados se muestran por separado para los niveles de desarrollo de riego actual.

Opciones	Confiabilidad media	Robustez (obj: 60%)	Robustez (obj: 70%)	Robustez (obj: 80%)	Resiliencia	Vulnerabilidad
BASE	74.3	1.0	0.9	0.1	0.54	0.010
IN	74.3	1.0	0.9	0.1	0.53	0.010
AS	74.3	1.0	0.9	0.1	0.54	0.010
MO	76.0	1.0	0.9	0.1	0.56	0.009
SI	75.1	1.0	0.9	0.1	0.48	0.009
MO-AS	76.0	1.0	0.9	0.1	0.56	0.009
SI-AS	75.1	1.0	0.9	0.1	0.48	0.009
SI-MO	76.9	1.0	0.9	0.3	0.56	0.008
SI-MO-AS	76.9	1.0	0.9	0.3	0.56	0.008

Cuadro 8.8 Resumen de los indicadores de desempeño para la satisfacción de la demanda de riego para la infraestructura de línea de base y las ocho opciones/portafolios analizados. Los resultados se muestran por separado para los niveles de desarrollo planificado para el horizonte 2035.

Opciones	Confiabilidad media	Robustez (obj: 60%)	Robustez (obj: 70%)	Robustez (obj: 80%)	Resiliencia	Vulnerabilidad
BASE	52.9	0.1	0.0	0.0	0.53	0.011
IN	53.0	0.1	0.0	0.0	0.53	0.011
AS	58.4	0.3	0.1	0.0	0.51	0.011
MO	54.8	0.1	0.0	0.0	0.54	0.011
SI	53.5	0.1	0.0	0.0	0.46	0.012
MO-AS	60.3	0.8	0.1	0.0	0.53	0.011
SI-AS	59.3	0.3	0.1	0.0	0.47	0.011
SI-MO	55.5	0.1	0.0	0.0	0.54	0.011
SI-MO-AS	61.3	0.8	0.1	0.0	0.54	0.011

Los resultados mostrados en esta sección sugieren que las opciones de intervención evaluadas presentan beneficios limitados en términos de mejora de la robustez y la resiliencia del sistema frente al cambio climático. Sin embargo, esta observación ha de ponerse en contexto y analizarse con precaución. Los valores de los indicadores de desempeño (Cuadro 8.7 y Cuadro 8.8) hacen referencia al valor promedio ponderado a nivel de todo el sistema de gestión, habiéndose obtenido a partir de los valores calculados individualmente para cada nodo de demanda.

Se ha observado que mientras ciertas intervenciones pueden ayudar a mejorar el desempeño en nodos específicos de demanda, el beneficio global resulta pequeño cuando el desempeño se agrega a nivel de cuenca. En el Apéndice A8 se recogen los valores de los índices de desempeño calculados para todos los nodos de demanda.

Con el objeto de ilustrar los cambios de desempeño que acontecen a lo largo de la región de estudio, se presentan aquí los valores de confiabilidad agregados para cada uno de los seis sectores de riego integrados en la zona de valle e intermedia de la cuenca (sistema regulado por el reservorio de Tinajones) y para diferentes condiciones climáticas (ver Figura 8.2, Figura 8.3, Figura 8.4). En estas figuras, los valores de confiabilidad se representan en términos de ganancia de puntos porcentuales respecto del escenario BASE para cada una de las diferentes opciones/portafolios de intervención analizadas (excepto IN), y bajo el horizonte de desarrollo IRRIG-2035 y tres escenarios climáticos (Seco: reducción de la precipitación del 40%; Promedio: condiciones similares a las históricas; Húmedo: aumento de la precipitación del 40%). Para el escenario seco (Figura 8.2), las diferencias espaciales en la mejora de la confiabilidad son más acusadas en el sector de Reque (hasta 14 puntos porcentuales), y menores para los sectores de Chongoyape, Coop. Agroind., Lambayeque (hasta 6 puntos porcentuales). Diferencias similares se encuentran para el escenario promedio (Figura 8.3) y húmedo (Figura 8.4).

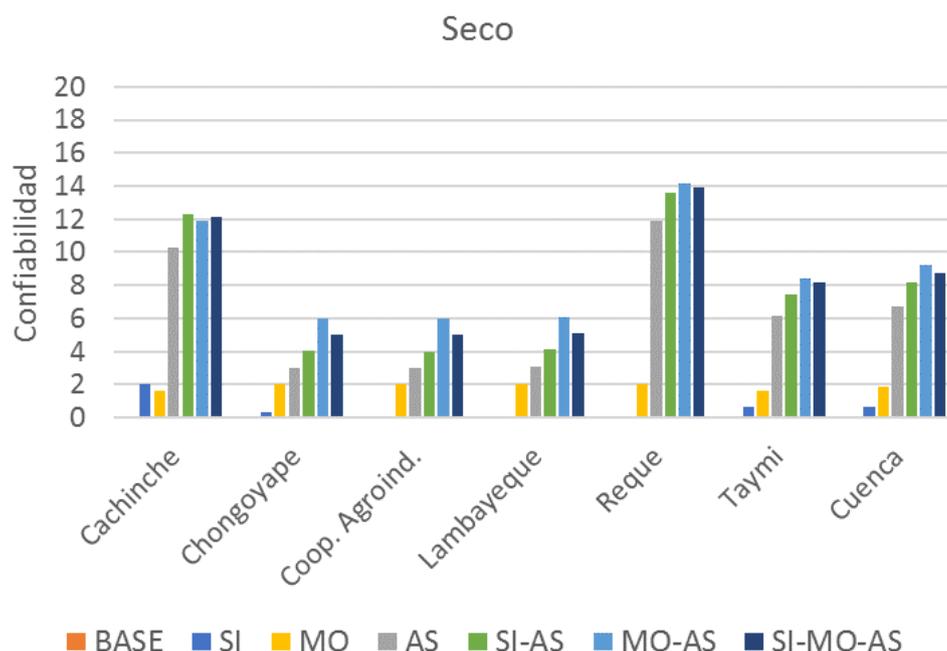


Figura 8.2 Aumento relativo de confiabilidad (en puntos porcentuales) para satisfacer la demanda de riego a nivel de sector de riego en el horizonte de desarrollo IRRIG-2035 y un escenario climático seco (reducción de la precipitación del 40%). Se muestra el impacto de no intervención (BASE) y las diferentes opciones/portafolios analizados.

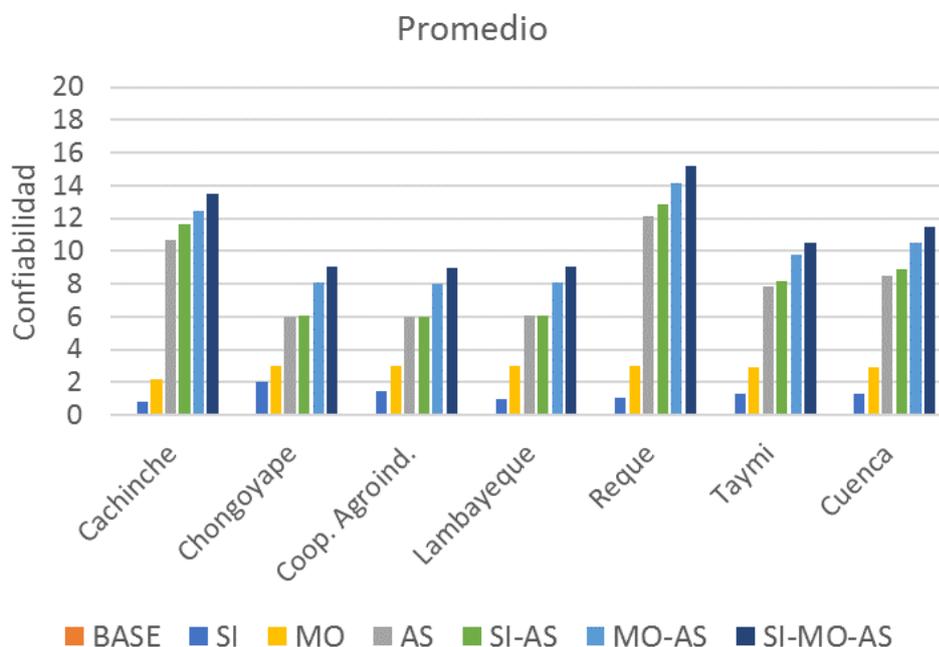


Figura 8.3 Aumento relativo de confiabilidad (en puntos porcentuales) para satisfacer la demanda de riego a nivel de sector de riego en el horizonte de desarrollo IRRIG-2035 y un escenario climático seco (reducción de la precipitación del 40%). Se muestra el impacto de no intervención (BASE) y las diferentes opciones/portafolios analizados.

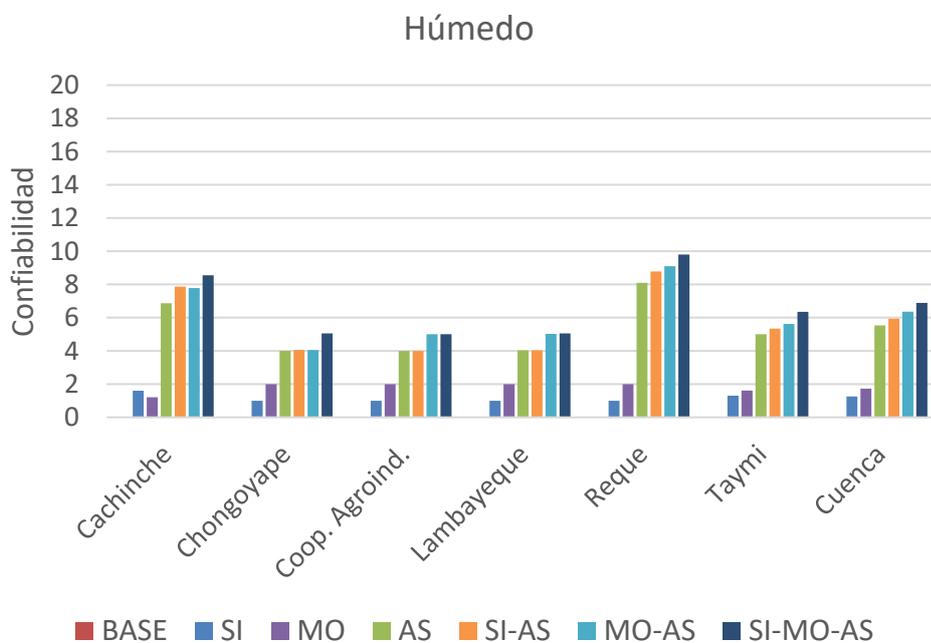


Figura 8.4 Aumento relativo de confiabilidad (en puntos porcentuales) para satisfacer la demanda de riego a nivel de sector de riego en el horizonte de desarrollo IRRIG-2035 y un escenario climático seco (reducción de la precipitación del 40%). Se muestra el impacto de no intervención (BASE) y las diferentes opciones/portafolios analizados.

8.5 Rentabilidad de los portafolios de intervención

De cara a priorizar las intervenciones, se han considerado los costes asociados a cada una de las opciones, y más específicamente, los cambios relativos en el desempeño de cada opción por dólar invertido. Para el análisis, se ha seleccionado la medida de confiabilidad promedio para abastecer la demanda poblacional (Figura 8.10), ya que marca las diferencias de desempeño con mayor nitidez.

La Figura 8.9 muestra la clasificación de las ocho opciones basada en los valores promedio de confiabilidad (%) en relación a los costos totales (millones de dólares). Los resultados muestran al portafolio MO-AS como la opción que proporciona los mayores beneficios de rendimiento por un costo relativamente pequeño (198 millones de dólares). MO proporciona un mejor rendimiento que el SI para mejorar la fiabilidad del suministro de agua, sin embargo, por un costo adicional de 10 millones de dólares (168 frente a 158 millones de dólares). Además, las represas SI-MO juntas no brindan suficientes beneficios para justificar el alto costo (326 millones de dólares).

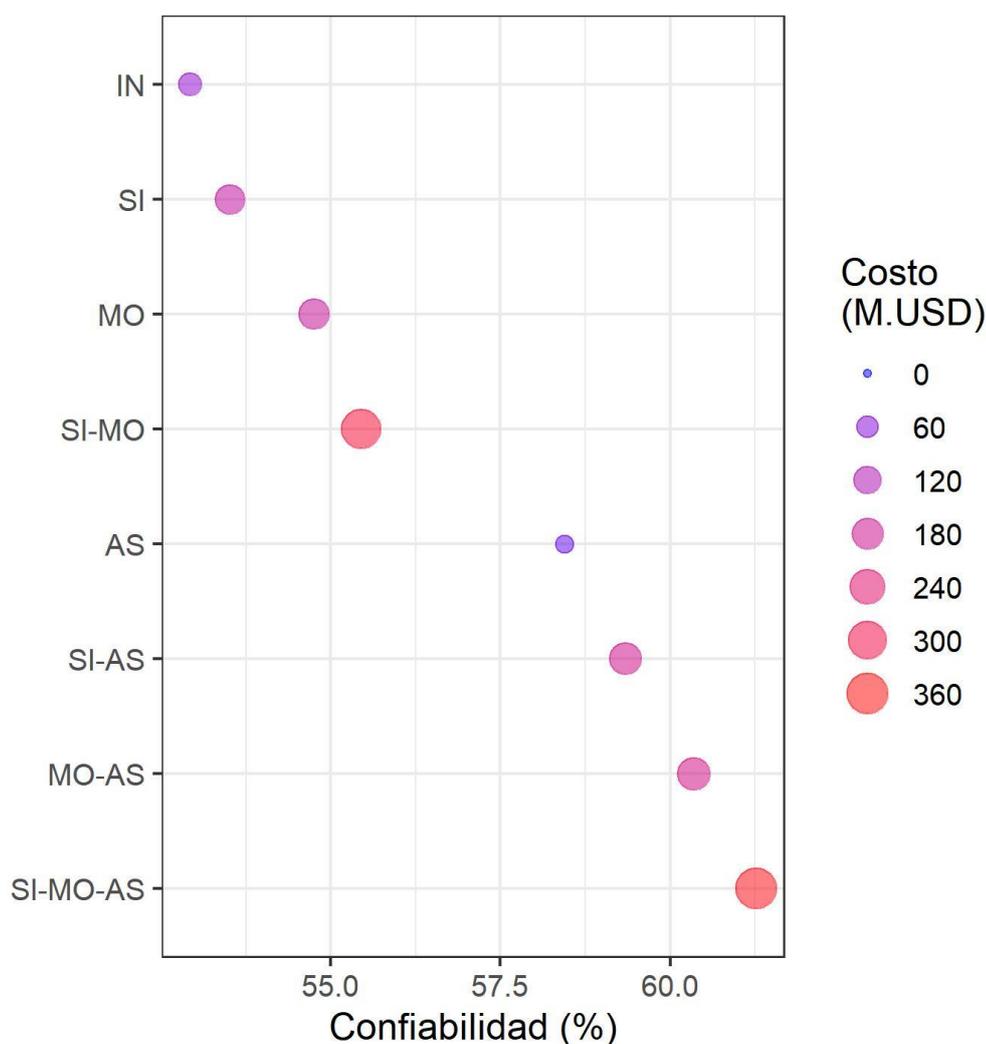


Figura 8.9 Clasificación de alternativas y carteras de intervención según valores de confiabilidad promedio y costes totales de ejecución.

Finalmente, se ha cuantificado el costo-efectividad incremental (CEI) de cada opción en relación con la situación de línea de base (sistema actual). Se define CEI como la cantidad de dinero invertido para incrementar un 1% la confiabilidad:

$$\text{Ratio de Costo Efectividad Incremental (CEI)} = \frac{\text{Costo del Proyecto}}{\text{Confiabilidad} - \text{Confiabilidad}^*}$$

Donde:

Confiabilidad, es el promedio de confiabilidad para la demanda de riego de la opción considerada (%)

Confiabilidad*, es el promedio del valor de confiabilidad para la demanda de irrigación para la situación de línea de base (%)

Costo, es el valor del costo total actual de la opción considerada (Millones de dólares).

La Figura 8.10 muestra el valor CEI para las ocho opciones planteadas. Los resultados muestran que SI es la opción menos costo-efectiva (268M USD por 1% de incremento en la confiabilidad), siguiéndole SI-MO (\$129), MO (\$91M), SI-MO-AS (\$42M), SI-AS (\$30M), MO-AS (\$27M), y AS (\$5.5M). Desde el punto de vista del coste-efectividad, las alternativas AS, MO-AS y SI-AS son las que mejores resultados muestran.

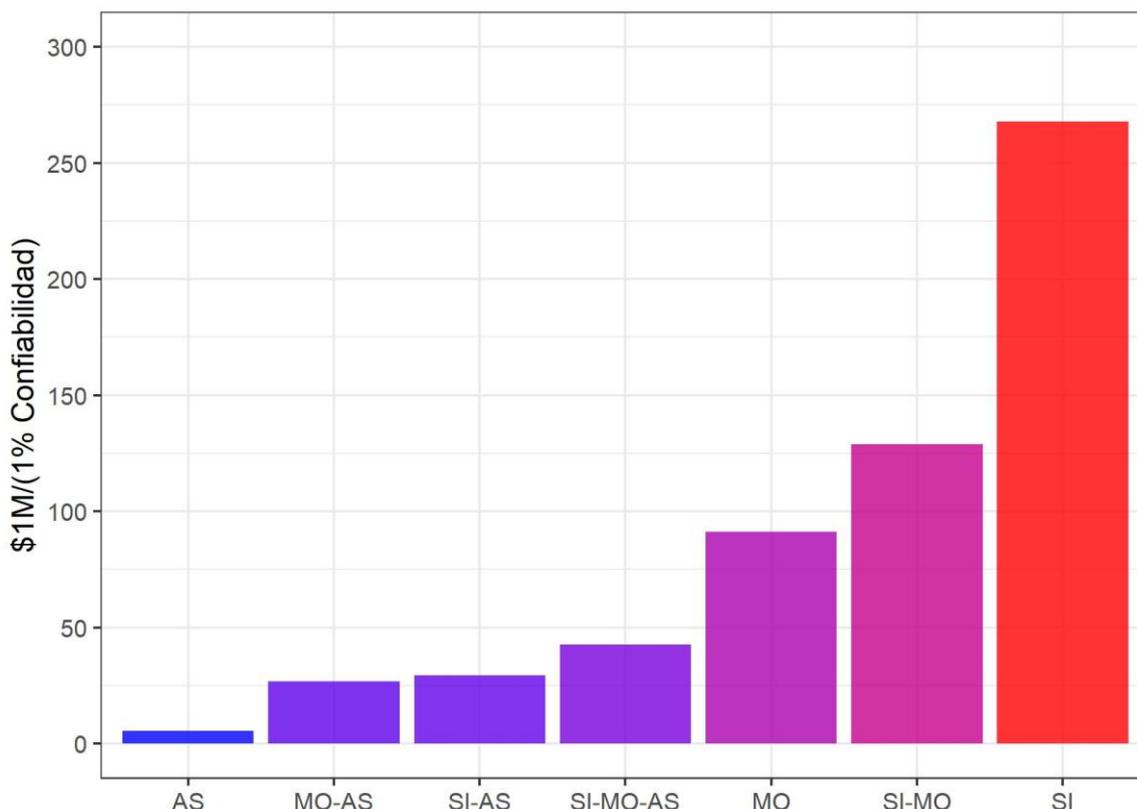


Figura 8.10 Clasificación de las alternativas de actuación según su valor costo-efectividad, calculada este como la ganancia porcentual de confiabilidad (%) según el costo total del proyecto (Millones de dólares).

8.6 Síntesis

En el análisis de Fase IV de la aplicación DTF a Chancay-Lambayeque, se evalúa el impacto que tendrían diferentes opciones de adaptación en términos de mejora de la robustez y resiliencia del sistema Chancay-Lambayeque bajo diferentes escenarios de incertidumbre climática y desarrollo del riego. Consideramos cuatro opciones de intervención: proyecto de manejo sostenible y restauración de la Infraestructura Natural (IN), aumento del uso de agua subterránea (AS), Presa de Sican (SI) y Presa La Montería (MO). Además, también se han evaluado cuatro portafolios consistentes en la combinación de diferentes intervenciones: SI-MO, SI-AS, MO-AS, SI-MO-AS. En total se han evaluado ocho posibles opciones de adaptación.

Estas opciones fueron evaluadas en términos de robustez en la confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad bajo el nivel actual de demanda de riego (RIEGO-BASE) y el escenario de aumento de la demanda de riego en el horizonte 2035 (RIEGO-2035). También se ha cuantificado Ratio de Costo Efectividad Incremental (CEI) para cada opción.

Las principales conclusiones son:

- No hay diferencias significativas entre las curvas de duración de caudal diario en la estación Racarumi bajo la línea de base (no actuación) y la opción IN. Sin embargo, la opción IN, que solo considera un paquete optimizado de actuaciones para el aumento del caudal en época de estiaje, proporciona una ligera reducción del periodo de retorno del caudal crítico, y por tanto del riesgo de inundación: esta reducción oscila entre el 3 y el 7% dependiendo del escenario de cambio de precipitación que se considere. No hay un beneficio neto en términos de aumento de la garantía de suministro para satisfacer la demanda de agua poblacional y de riego.
- No se observa una mejora neta en el desempeño del sistema para satisfacer la demanda poblacional para las opciones consideradas, ya de por sí bastante alto bajo el escenario de línea base (robustez = 100%), y el escenario de aumento de la demanda de riego en el horizonte 2035 (robustez = 99%).
- Los beneficios de las diferentes opciones se hacen más evidentes para los indicadores relativos a la demanda de riego. Bajo el desarrollo de irrigación de línea base (RIEGO-BASE), la robustez del sistema aumenta de 0.1 a 0.3 para los portafolios SI-MO y SI-MO-AS. Para el escenario RIEGO-2035 no se observan mejoras significativas en el valor de robustez para un objetivo de confiabilidad del 80%. Sin embargo, se observa que la confiabilidad promedio para satisfacer la demanda de riego aumenta del 53% al 61% en el marco de la opción de intervención más completa (SI-MO-AS). Le siguen MO-AS (aumento hasta el 60%), SI-AS (59%) y AS (58%).
- Incluso bajo la opción más completa (SI-MO-AS), el sistema de Chancay-Lambayeque no es robusto ni resiliente al cambio climático. Sin embargo, la robustez del sistema aumenta de 0,1 a 0,79 bajo las opciones MO-AS y SI-MO-AS (efecto sinergia) cuando el objetivo de confiabilidad para la demanda de riego se reduce del 80% al 60%.
- AS y MO proporcionan los mayores beneficios al sistema en términos satisfacción de las demandas con los menores costos (comparativamente). La inversión que debe realizarse para aumentar la confiabilidad del suministro de riego en un 1% (Efectividad del Costo Incremental, o CEI) es solo 5.5M USD para AS y 91M USD para MO. Cuando se consideran juntas las intervenciones, el CEI es de 27M USD.

Los resultados y observaciones que resultan de este estudio hacen referencia a valores agregados de los índices de desempeño a escala de cuenca o sistema de gestión, y por tanto pueden cambiar si se analizan los efectos de las intervenciones a escala local o a nivel de nodo de demanda. El efecto de la dimensión espacial cuando se agregan los indicadores de desempeño añade un nivel de complejidad adicional que ha de considerarse y consensuarse con los usuarios y principales actores involucrados en la gestión de la cuenca y la toma de decisiones.

9 Conclusiones

Este estudio aplica el Marco del Árbol de Decisión (DTF) desarrollado por el Banco Mundial a la cuenca hidrográfica de Chancay-Lambayeque con el objetivo de evaluar su robustez en una amplia gama de futuros plausibles y proporcionar orientación sobre la evaluación y priorización de una cartera de posibles intervenciones diseñadas para mejorar la resiliencia del sistema. Nuestro análisis proporciona una evaluación de la vulnerabilidad actual del sistema, así como la que resulta bajo la aplicación de un conjunto de intervenciones que incluyen el desarrollo de infraestructura natural, el uso de aguas subterráneas y nuevas presas. El análisis se realiza utilizando un modelo hidrológico agregado de base empírica y paso diario (HydroBID) y un modelo dinámico de asignación de recursos a nivel de cuenca y paso mensual (WEAP) para proporcionar indicadores de confiabilidad, vulnerabilidad, robustez y resiliencia agregados a nivel de cuenca. Por lo tanto, las posibles vulnerabilidades o beneficios a escalas espaciales más pequeñas (por ejemplo, a nivel de sitio), y pasos de tiempo más pequeños (por ejemplo, eventos de inundación relámpago) no se investigaron en este trabajo.

A través de un Análisis Inicial de alcance rápido (Sección 6), identificamos que el cambio climático y el nivel de demanda de riego son las fuentes más importantes de incertidumbre para la resiliencia y robustez del sistema Chancay-Lambayeque. Posteriormente se analiza el grado de estrés del sistema y la infraestructura actual (Sección 7) considerando estas dos incertidumbres junto con la incertidumbre de la variabilidad natural. Los resultados de las pruebas de estrés mostraron que la principal vulnerabilidad del sistema se concentra en la satisfacción de la demanda de riego, y muy especialmente para el horizonte 2035 para el que se ha planificado un incremento de la demanda. El nivel de confiabilidad para satisfacer la demanda poblacional, así como el riesgo de ocurrencia de caudales extremos e inundaciones, no son sensibles a cambios futuros.

En la fase final de Gestión de Riesgos Climáticos (Sección 8), se han considerado ocho opciones de intervención para mejorar la robustez y la resiliencia del sistema, y especialmente en términos de confiabilidad para satisfacer la demanda de riego. Entre las opciones evaluadas, consensuadas con los actores y agentes locales, se consideraron proyectos de Infraestructura Natural (IN), aumento de la explotación y uso de aguas subterráneas (AS), y las presas de Sican (SI) y La Montería (MO). No se tuvieron en consideración actuaciones encaminadas a mejorar la gestión de los sistemas de riego (incluido pérdidas en los sistemas de distribución y adaptación de cultivos). Los resultados de la fase de gestión de riesgos demuestran que ninguna de las opciones mejora sustancialmente la confiabilidad global del sistema para satisfacer la demanda de riego, incluso bajo los escenarios con mayor abundancia de agua. Sin embargo, las intervenciones pueden generar beneficios locales o a nivel del nodo que han de tenerse en cuenta en futuros análisis. En cualquiera de los casos, los resultados del presente estudio ponen en evidencia que el cambio en la demanda de riego es un factor clave para incrementar la robustez y resiliencia del sistema Chancay-Lambayeque, mayor que incluso los cambios de clima proyectados para el futuro.

De entre las ocho opciones de intervención evaluadas, un incremento en el uso de aguas subterráneas (AS) es la opción más costo-efectiva ya que proporciona un aumento significativo de la confiabilidad a un costo relativamente bajo. Entre las dos presas consideradas, MO es la opción más rentable, también priorizada con AS. SI es relativamente menos eficaz y más costosa, debido a que la entrada principal de agua a SI estaría conectada al actual reservorio de Tinajones, y por tanto sus posibles efectos cabrían esperarse a nivel estacional más que a nivel anual.

Durante periodos de sequías de varios años, SI no proporcionaría un incremento en la garantía para satisfacer la demanda de agua del sistema ya que el embalse de Tinajones también estaría vacío.

Por último, debe enfatizarse que este estudio solo se enfoca a la evaluación del desempeño del sistema en relación a la satisfacción de la demanda y el riesgo de inundaciones, y que únicamente compara diferentes alternativas de actuación en base a datos a indicadores de confiabilidad, vulnerabilidad y resiliencia. Un análisis de las alternativas en base a otros criterios, por ejemplo Valor Neto Actual, podrían resultar en una priorización diferente a la obtenida en este estudio. Esto es especialmente relevante para el caso de las intervenciones que implican Infraestructura Natural ya que estas actuaciones suelen proveer co-beneficios comercializables (miel, setas, madera) y no-comercializables (mejora de calidad de agua)

10 Recomendaciones

De acuerdo a los resultados derivados del presente estudio, se ha confeccionado una lista de recomendaciones a tener en cuenta para el sistema Chancay-Lambayeche:

Mejora de datos, modelización y análisis

- **Diseño e implementación de un Sistema de monitoreo hidrometeorológica.** La ausencia de series, de datos meteorológicos y de caudal, largas, homogéneas y continuas en el tiempo, ha supuesto una limitación importante a la hora de ejecutar el proyecto. Esto ha sido particularmente crítico en relación con la disponibilidad de mediciones de caudal y series largas de datos (solo disponibles en la estación de aforos de Racarumi). La existencia de series largas (superiores a 50 años) ayudaría a mejorar la caracterización de la variabilidad natural del clima a largo-plazo de los efectos del cambio climático, y por tanto mejoraría la calibración y validación de los modelos de generación del clima e hidrológicos.
- **Implementación de un modelo distribuido de base física para mejorar la simulación del impacto hidrológico de la Infraestructura Natural.** El presente estudio ha hecho uso de HydroBID, un modelo hidrológico agregado de base empírica, para simular los efectos del cambio climático y la Infraestructura Natural sobre la dinámica y funcionamiento hidrológico de la cuenca. A pesar de que HydroBID y otros modelos basados en el número de curva (ej. SWAT) se han aplicado en diferentes contextos de América Latina en los últimos años, estos modelos son poco adecuado para simular fielmente la respuesta de la cuenca a cambios en la cobertura del suelo, y en particular los intercambios de agua y energía en la interfase suelo-agua-atmósfera. Una de las posibles causas puede radicar en que los valores empíricos del número de curva para los países andinos no están lo suficientemente contrastados y validados. El uso de una modelización espacialmente distribuida, apoyada con información de satélite, y que explícitamente reconozca los cambios de cobertura y uso del suelo mediante, y los procesos de recarga y descarga de acuíferos, unido a una mejora en la calibración y validación del modelo a escala de subcuenca contribuiría capturar y evaluar de manera más efectiva y precisa el impacto neto de la IN en un escenario de cambio climático. Se recomienda continuar investigando y mejorando nuestra comprensión sobre el funcionamiento ecohidrológico de la cuenca, y cómo los cambios de vegetación y otros atributos del paisaje, y del clima afectan la hidrología local y los patrones de recarga subterránea a escala de subcuenca.
- **Recolección y procesamiento de datos espaciales para la mejora del análisis de riesgo de inundación.** El presente estudio provee una primera aproximación para conocer y controlar los riesgos de inundación en la cuenca. Sin embargo, se requiere reforzar el análisis, y las conclusiones, con un mayor número de registros y datos. Esta mejorar incluiría la identificación de zonas vulnerables a inundación y el desarrollo de funciones altura de inundación-daño que permitan estimar las posibles pérdidas económicas según el riesgo de inundación.

Gestión adaptativa de los recursos hídricos.

- **Desarrollo de un sistema de pronóstico decadal y estacional de extremos hidrometeorológicos ligados al fenómeno ENSO.** Como se ha puesto de manifiesto en el presente estudio, el sistema Chancay-Lambayeque padece la recurrencia de eventos extremos de precipitación-inundación y de sequías ligadas al patrón ENSO. La predicción anticipada de estos eventos a una escala decadal-estacional mejoraría la capacidad de adaptación y preparación frente a estos extremos. El pronóstico estacional puede abordarse mediante el uso de modelos estadísticos o de base física (see Goddard et al., 2001), mientras que las predicciones hidrológicas pueden apoyarse en sistemas como Delft-FEWS.
- **Diseño de reglas de operación que optimicen la gestión del embalse de Tinajones y otras infraestructuras bajo situaciones de normalidad, sequía y años húmedo.** Considerando la variabilidad interanual del sistema, las curvas y reglas de operación podrían actualizarse. Combinado con un sistema de pronóstico estacional, esto mejoraría la gestión de los embalses en periodos de sequía recurrentes y durante eventos de inundación críticos. A este respecto se recomienda explorar los beneficios de una posible estrategia multianual de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas que fomente la recarga de acuíferos durante los periodos húmedos y la explotación intensiva de aguas subterráneas en periodos de sequía.
- **Mejora de la eficiencia del riego y la selección de cultivos.** Los actuales sistemas de cultivo y riego en Chancay-Lambayeque pueden mejorarse (por ejemplo, implementación de riego localizado, o aplicación de estrategias de riego deficitario) de cara a reducir las necesidades y requerimientos de agua, y reducir en consecuencia la vulnerabilidad del modelo productivo al cambio climático. En general, la mejora en eficiencia del uso de agua es considerada una medida muy eficaz y costo-eficiente.
- **Reducción de las pérdidas en los sistemas de distribución y mejora de los sistemas de riego.** En la actualidad, las pérdidas de distribución en los canales de riego rondan el 60% lo que redundo en mayores requerimientos de agua para cubrir la demanda neta de los cultivos. Una mejora en el sistema de distribución aumentaría los valores de confiabilidad y robustez del sistema para satisfacer las demandas de riego bajo los contextos de cambio climático y aumento de la demanda.

- **Mejorar la cuantificación del análisis coste-beneficio asociado a las actuaciones de mejora de la Infraestructura Natural.** En ocasiones la falta de datos dificulta poder estimar con precisión los costes de oportunidad vinculados a este tipo de actuaciones, así como beneficios directos (explotación de recursos y productos derivados como la miel y la madera que aumentan las oportunidades de desarrollo local) e indirectos (de provisión y de regulación⁴) que puedan derivarse de estas intervenciones. Se recomienda invertir más esfuerzos en la toma y recolección de datos biofísicos y económicos que permitan analizar con mayor precisión la balanza coste-beneficio de este tipo de intervenciones.

⁴ Entre los servicios de regulación, pueden destacarse aquellos que involucran una mejora de la disponibilidad de agua en periodos de estiaje, el aumento de la recarga de acuíferos, la mejora de la calidad de las aguas, y el aumento del reservorio de carbono en el suelo. Entre los servicios de conservación destacarían la reducción de los procesos erosivos y las pérdidas de suelo, así como del riesgo de inundaciones o colmatación de reservorios.

11 Bibliografía

Autoridad Nacional del Agua (2015). Plan de Gestión de los Recursos Hídricos de la cuenca Chancay-Lambayeque. Lima, Perú.

AQUASEC (2015). Chancay-Lambayeque Basin at a Glance. Retrieved from <http://aquasec.org/wp-content/uploads/2015/05/ChancayLambayequeFactSheet-English.pdf>

Bebbington, A., & Williams, M. (2008). Water and Mining Conflicts in Peru. *Mountain Research and Development*, 28(3/4), 190–195

Brown, C., Werick, W., Leger, W., & Fay, D. (2011). A decision-analytic approach to managing climate risks: Application to the upper great lakes. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 524–534

Camacho-Sandoval, J. (2008). Coeficiente de concordancia para variables continuas. *Acta Médica Costarricense*, 50(4), 211-212.

Escurra, J., Moreda, F., Brantly, E., & Daussa, P. (2016). Hydro-BID case study N°3: Impact of El Niño events on sediment loading in the Chancay- Lambayeque Basin, Peru.

French, A., & Mechler, R. (2017). Managing El Niño Risks Under Uncertainty in Peru: Learning from the past for a more disaster-resilient future. Laxenburg, Austria.

Global Water Partnership. (2000). *Integrated Water Resources Management*. Stockholm.

Grijzen, J. (2014). *Understanding the Impact of Climate Change on Hydropower: the case of Cameroon*. Washington, DC.

Groves, D. G., & Lempert, R. J. (2007). A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Global Environmental Change*, 17(1), 73–85.

Gobierno Regional Lambayeque (2018). *Plan De Desarrollo Hidráulico De La Región Lambayeque*

Goddard, L., Mason, S. J., Zebiak, S. E., Ropelewski, C. F., Basher, R., & Cane, M. A. (2001). Current approaches to seasonal to interannual climate predictions. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(9), 1111-1152

Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2), 485–498

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14–20.

Herman, J. D., Reed, P. M., Zeff, H. B., Characklis, G. W., Asce, S. M., Reed, P. M., ... Asce, M. (2015). How Should Robustness Be Defined for Water Systems Planning under Change? *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10), 4015012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000509](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000509)

INEI (1994) Censos Nacionales 1993 IX de Población y IV de Vivienda, Perú

INEI (2008) Censos Nacionales 2007: XI de población y VI de vivienda

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., and Woollen, J. (1996). "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project." *Bull.Am.Meteorol.Soc.*, 77(3), 437-472.

Kane, R. P. (1999). "Rainfall extremes in some selected parts of Central and South America: ENSO and other relationships reexamined." *Int.J.Climatol.*, 19(4), 423-455.

Lavado, C., Waldo, S., Labat, D., Carlo Espinoza, J., Guyot, J. L., and Ronchail, J. (2012). "Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969-2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages." *Hydrol.Sci.J.-J.Sci.Hydrol.*, 57(4), 625-642.

Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J. et al. (2008). *Robust Optimization of Large-Scale Systems. Operations Research*, 43(2), 264–281

Ray, P. A., & Brown, C. M. (2015). *Confronting Climate Uncertainty in Water Resources Planning and Project Design. The Decision Tree Framework. Washington DC.*

Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., and Felipe, O. (2017). "Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast." *Int.J.Climatol.*, 37(1), 143-158.

Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., and Wang, W. (2002). "An improved in situ and satellite SST analysis for climate." *J.Clim.*, 15(13), 1609-1625.

Steinschneider, S., & Brown, C. (2013). A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments. *Water Resources Research*, 49(11), 7205–7220. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20528>

Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J., Vuille, M., and Lavado-Casimiro, W. (2018). "Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru." *Int.J.Climatol.*, 38(1), 420-435.

Taner, M. Ü., Ray, P., & Brown, C. (2017). Robustness-based evaluation of hydropower infrastructure design under climate change. *Climate Risk Management*, 18.

Taner, M. Ü., Ray, P., & Brown, C. (2019). Incorporating Multidimensional Probabilistic Information into Robustness-based Water Systems Planning. *Water Resources Research*, 2018WR022909. <https://doi.org/10.1029/2018WR022909>

Tapley, T. D., and Waylen, P. R. (1990). "Spatial Variability of Annual Precipitation and Enso Events in Western Peru." *Hydrol.Sci.J.-J.Sci.Hydrol.*, 35(4), 429-446.

The World Bank. (2017). *Peru Integrated Water Resources Management in Ten Basins*. Washington, DC.

Vano J., T. Das and D. Lettenmaier, 2012: Hydrologic sensitivities of Colorado River runoff to changes in precipitation and temperature, *Journal of Hydrometeorology*.

Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J., and Viterbo, P. (2014). "The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data." *Water Resour.Res.*, 50(9), 7505-7514.

ANEXOS

A1 Programas del taller de introducción en Chiclayo (28-31 de enero, 2019)

Tiempo	Actividad	Participantes	Ubicación
Reunión de Presentación, Jueves 25 de Enero			
8:00 am – 9:00 am	Presentación de Propuesta Consorcio – Plan de Trabajo	Todos los participantes	Jefatura ANA Petirrojos 255 San Isidro
11:30 am - 12:30 pm	Sistema Hídrico Integral del Valle Chancay - Lambayeque de la Región Lambayeque		PROINVERSION Av. Canaval y Moreyra 150, Piso 8 San Isidro - Lima - Perú
16:00 pm - 17:00 pm	VC#01: Banco Mundial		MGRH Pablo Carriquiry 272 San Isidro
Viaje Lima - Chiclayo, Domingo 27 de Enero			
Día 1, Lunes 28 de Enero			
8:00 am – 11:00 am	Bienvenida - Descripción general de las intervenciones en la cuenca Hidrográfica Chancay Lambayeque (actuales y propuestas)	Todos los participantes	Oficina del CRHC CH-L (Chiclayo)
	Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Plan de Gestión – Plan Hidráulico Regional		
12:00 pm – 13:00 pm	Descripción general e intervención de infraestructura natural		
14:30 pm – 18:30 pm	Método: El Marco de Árbol de Decisión(DTF)		
	Descripción del Proyecto El Marco de Árbol de Decisión en la Cuenca Chancay Lambayeque		
	Debate 1: Chancay-Lambayeque; desafíos y preocupaciones para la gestión integrada de Recursos Hídricos		
	Debate 2: Chancay-Lambayeque; incertidumbres, medición del desempeño y umbrales		
	Debate 3: Chancay-Lambayeque; medidas de gestión de riesgos		
Día 2, Viajes de Campo, Martes 29 de Enero			
5:00 am – 13:00 pm	Visita de sitios importantes para intervenciones de infraestructura natural (Catache y Santa Cruz)	Todos los participantes	Parte media y alta de la Cuenca



Visita de sitios importantes para intervenciones de infraestructura natural (Catache y Santa Cruz)

14:30 am - 18:30 pm	Visita de sitios importantes para intervenciones de gestión del agua (Racarrumi, Juana Ríos, Tinajones)	Todos los participantes	Parte baja de la Cuenca
---------------------	---	-------------------------	-------------------------



Visita de sitios importantes para intervenciones de gestión del agua (Racarrumi, Juana Ríos, Tinajones)

Día 3, Miércoles 30 de Enero

6:00 am – 13:00 pm	Visita de sitios importantes para intervenciones de gestión del agua (Montería, Canal Taymi y Sicán)	Todos los participantes	Parte baja de la Cuenca
--------------------	--	-------------------------	-------------------------



Visita de sitios importantes para intervenciones de gestión del agua (Montería, Canal Taymi y Sican)

14:30 pm – 18:00 pm	Revisión de Información – Informaciones complementarias requeridas	Todos los participantes	Oficina del CRHC CH-L (Chiclayo)
	Propuesta de Actividades Febrero - Mayo		
	Plan de Trabajo – Compromisos y Encargos - Cronograma		
Día 4, Jueves 31 de Enero			
8:00 am – 11:00 am	PEOT – Planeamiento Hidráulico 2019 – 2025 Gobierno Regional	Todos los participantes	Oficina del CRHC CH-L (Chiclayo)
11:30 am – 13:00 pm	VC #2: Banco Mundial		
19:00 pm – 20:30 pm	Viaje Chiclayo - Lima		

A2 Programas del taller de introducción en Cajamarca (25 febrero, 2019)

Tiempo	Actividad	Participantes	Ubicación
Lunes, 25 de Febrero			
9:00 am – 9:15 am	Palabras de Bienvenida Presentación de invitados y asistentes	Todos los participantes	Laboratorio Regional del Agua – Gobierno Regional de Cajamarca
9:15 am – 9:45 am	Exposición: “Intervenciones (actuales y propuestas) en la Cuenca Hidrográfica Chancay – Lambayeque” – Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la Cuenca		
9:45 am - 10:30 pm	Descripción General e intervención de infraestructura natural		
10:45 pm - 12:15 pm	Método: El Marco de Árbol de Decisión (DTF) Descripción del proyecto El Marco de Árbol de decisión en la Cuenca Chancay – Lambayeque Debate 1: Cuenca Chancay Lambayeque; desafíos y preocupaciones para la gestión integrada de Recursos Hídricos. Debate 2: Cuenca Chancay Lambayeque; incertidumbres, medición del desarrollo y umbrales		
12:15 pm - 13:00 pm	Propuestas a incorporar en la metodología de El Marco de Árbol de Decisión (DTF)		
13:00 pm	Clausura del evento		



Taller realizado en Cajamarca

A3 Programas del taller de presentación de metodología y resultados en Chiclayo (27 de junio de 2019)

Tiempo	Actividad	Participantes	Ubicación
Presentación de Metodología y Resultados , Jueves 27 de Junio			
9:00 am – 9:30 am	Inscripción y presentación del taller Palabras de inauguración de las autoridades del ANA y Banco Mundial	Todos los participantes	Hotel Win Meier Av. Francisco Bolognesi 756, Chiclayo
9:30 am - 10:00 am	Resumen general del Marco del Árbol de Decisiones para la cuenca Chancay Lambayeque		
10:00 am - 11:00 am	Presentación de resultados de la Fase 1 y 2 del Marco del Árbol de Decisiones para la cuenca Chancay Lambayeque		
11:00 am - 11:30 am	Coffee break		
11:30 am - 12:30 pm	Presentación de resultados de la Fase 3 del Marco del Árbol de Decisiones para la cuenca Chancay Lambayeque		
12:30 pm - 13:30 pm	Almuerzo		
13:30 pm - 14:30 pm	Presentación de resultados de la Fase 4 del Marco del Árbol de Decisiones para la cuenca Chancay Lambayeque		
14:30 pm - 15:30 pm	Comentarios y discusión		
15:30 pm - 16:00 pm	Palabras de cierre del Director de la ANA		



A4 Modelo HydroBID de simulación hidrológica

El sistema Hydro-BID para la simulación hidrológica y del impacto del cambio climático tiene tres componentes principales: el Conjunto de Datos de Hidrología Analítica (Analytical Hydrographic Dataset, AHD), la base de datos y el modelo de simulación hidrológica. El AHD es una representación digital de los límites de captación y los segmentos de drenaje para toda la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC), la cual contiene más de 230,000 cuencas con un área promedio de 83 km² para Sudamérica y 23m² para la región de Centroamérica y el Caribe. La base de datos contiene información asociada con cada cuenca, que incluye el área de drenaje, longitud de la corriente, pendiente, usos de tierra y tipo de suelo. El modelo de simulación hidrológica es una versión mejorada del modelo standard de Función de Carga de Cauces Generalizados (ASLF, por sus siglas en inglés), en conjunto con una metodología nueva de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing) desarrollada por RTI.

El modelo calcula la escorrentía y el flujo base por cuenca. ASLF estima la escorrentía utilizando el método del número de curva de escorrentía (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Los NC de cuenca se almacenan en la base de datos y son determinados por el suelo de la vertiente y las condiciones de cobertura del suelo, las cuales se representan como grupo del suelo hidrológico, tipo de cobertura, tratamiento y condición hidrológica. Después de la estimación de la escorrentía, el exceso de precipitación se infiltra en la capa insaturada donde queda sujeta a la evaporación. Con el tiempo, el agua infiltrada se filtra desde la capa insaturada hacia abajo para rellenar el almacenamiento saturado. El agua dentro de la capa saturada entra al canal de la corriente como flujo base donde se combina con la escorrentía de la cuenca y todo flujo entrante desde las cuencas corriente arriba para proporcionar el volumen de caudal para el día.

La parametrización del modelo de cada cuenca busca representar la variabilidad en las propiedades físicas de la vertiente. Se configuran los NC para representar cada combinación de uso de tierra y tipo de suelo subyacente (ver Apéndice A7.1 para una descripción detallada del proceso de asignación del NC en la cuenca Chancay-Lambayeque). Se aplica una parametrización mucho más generalizada a los niveles de cuenca e incluye parámetros para el Nivel de Agua Disponible (AWC, por sus siglas en inglés), los coeficientes de recesión e infiltración que están establecidos para representar todas las combinaciones de uso de tierra y suelos dentro de la cuenca. Estos parámetros se introducen para calibrar el modelo y para optimizar su rendimiento en la simulación de los flujos de corriente observados. El proceso de calibración y validación del modelo HydroBID para la cuenca de Chancay-Lambayeque se realizó tomando en consideración los valores de caudal registrados en la estación de Racarumi para el periodo 2000-2010. Los estadísticos de desempeño para el periodo de calibración 2000-2004 y de validación 2005-2010 se presentan en el Cuadro A4.1 y la Figura A4.1

Los resultados del modelo se generan como una serie de tiempo para la predicción del caudal, ya sea como un lapso diario o mensual. El sistema tiene una Interfaz de Usuario Gráfica (GUI, por sus siglas en inglés) para facilitar la carga y proceso de la entrada del modelo, así como para mostrar los resultados de los modelos gráfico y tabulado. El modelo hidrológico utiliza la estructura de datos y las topologías de redes de drenaje y cuencas de AHD para generar las estimaciones de flujo en la salida de cualquier cuenca o captación que seleccione el usuario. Además de la generación de flujo, HydroBID incluye otros tres módulos para 1) simulación de reservorio, 2) transporte de sedimentos, y 3) interacciones entre la superficie y el agua subterránea utilizando MODFLOW.

Cuadro A4.1 Estadísticos de desempeño para el periodo de calibración y validación (2000-2010) del modelo HydroBID en la estación de Racarumi.

Estadístico de desempeño	Periodo de calibración (2000-2004)		Periodo de validación (2005-2010)	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Error de volumen general (%)	-1.78	-0.70	9.84	9.61
Correlación, $r(-)$	0.8	0.89	0.82	0.88
Correlación modificada, R_{mod}	0.76	0.77	0.77	0.74
Eficiencia Nash-Shutcliffe, NSE	0.57	0.72	0.60	0.67

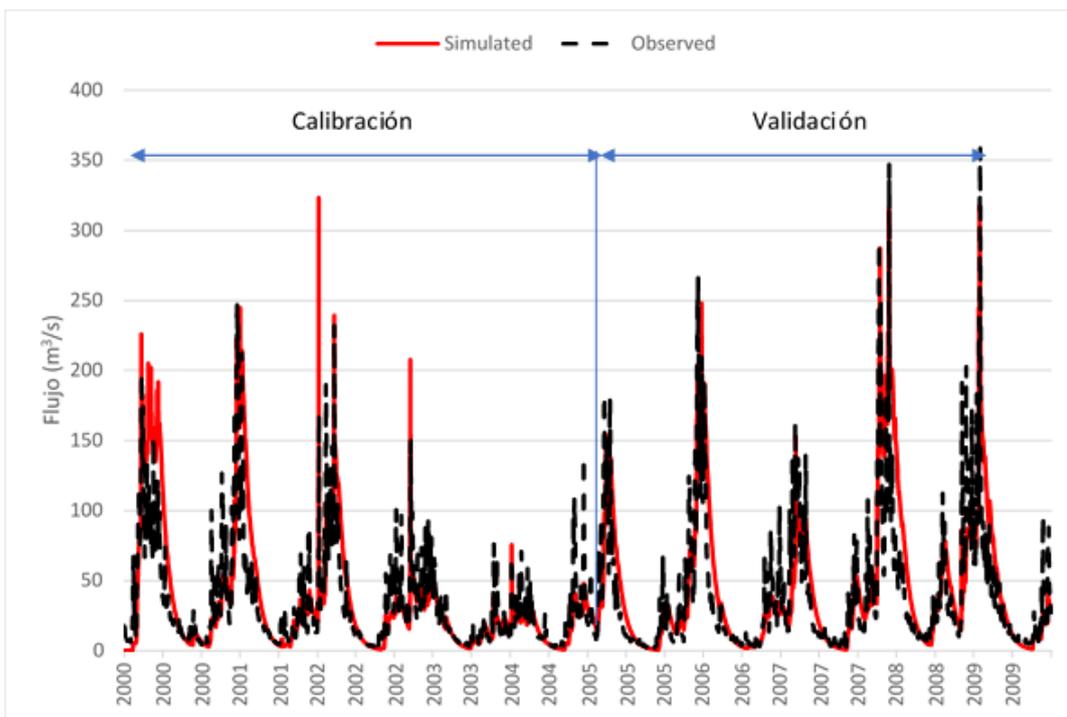


Figura A4.1 Valores de caudal observados y simulados en la estación de Racarumi para el periodo de calibración y validación del modelo HydroBID.

A5 Modelo WEAP de asignación de recursos

A5.1 Datos básicos y principales elementos de actualización

Fueron entregados por el consejo al equipo consultor dos versiones del modelo WEAP de asignación de recursos desarrollado para la cuenca: (1) el modelo utilizado para el Plan PGRH (modelo WEAP-PLAN, Figura A5.1)) y (2) el modelo utilizado para el proyecto PARA-Agua (modelo WEAP-PARA). Para este trabajo, los expertos del consejo recomendaron utilizar como modelo de referencia para el análisis el primero de los modelos para ser coherente con el PGRH de la cuenca de Chancay-Lamabayeque, y por la ocurrencia de ciertas imprecisiones y la mayor complejidad del modelo PARA-Agua que harían inviable su uso para el análisis DTF.

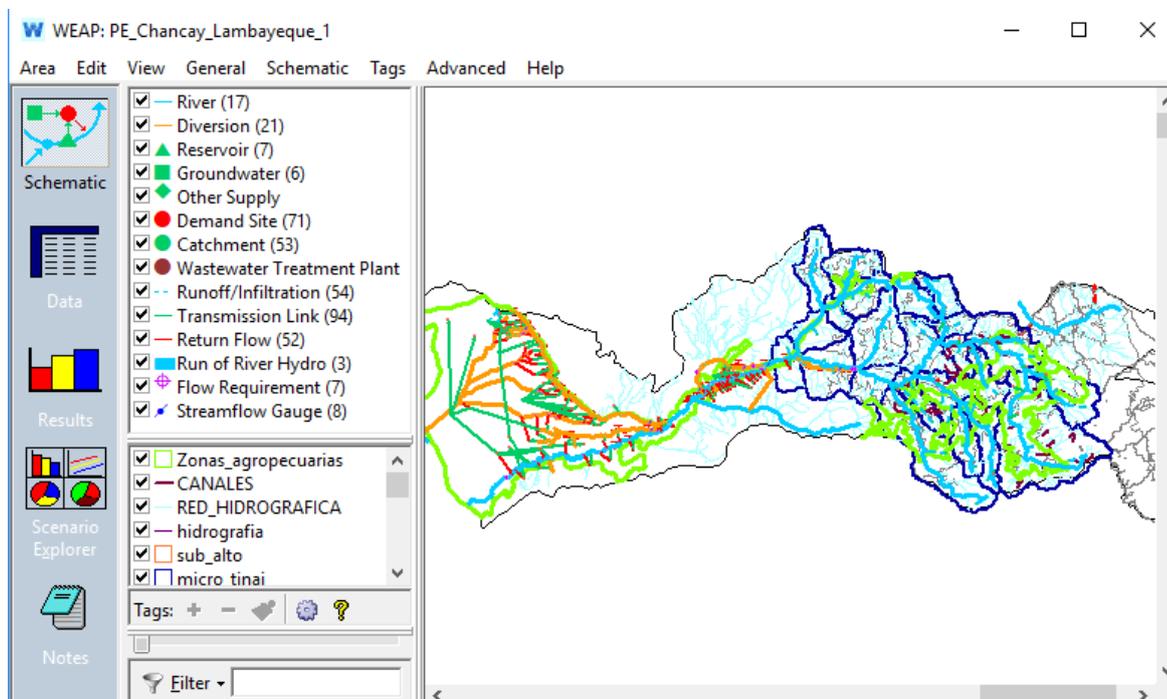


Figura A5.1 Modelo WEAP-PLAN utilizado como base para el análisis DTF.

La versión entregada del modelo WEAP-PLAN estaba integrada por los siguientes elementos:

- 52 nodos de cuenca;
- 5 nodos de demanda doméstica;
- 62 nodos de demanda agraria;
- 2 nodos de demanda industrial;
- 2 nodos de demanda minera;
- 17 tramos de río;
- 7 embalses;
- 6 nodos de agua subterránea;
- 94 enlaces de trasmisión;
- 21 canalizaciones.

El modelo WEAP-PLAN fue calibrado sobre datos para la estación Racarumi, e incluye dos de las intervenciones contempladas para el análisis DTF, a saber:

- 1) Aumento del bombeo de aguas subterráneas (AS) para satisfacer las nuevas demandas de riego en los sectores de Cachinche, Taymi y Reque, y
- 2) Presa de La Montería y canal de alimentación desde el río Chancay (MO). Las características del embalse fueron revisadas y, en su caso, ajustadas de acuerdo a los datos más recientes disponibles.

Para las fases III (Prueba de Estrés Climático) y IV (Gestión del Riesgo Climático) del análisis DTF, el modelo ha sido convenientemente actualizado mediante la incorporación de nuevos elementos y la simplificación de la estructura topológica. En adelante el modelo resultante será denominado WEAP-DTF. En el Cuadro A5.1 se muestra un resumen de las diferencias entre modelos en términos de número total de elementos configurados. A continuación se detallan las principales modificaciones y actualizaciones realizadas.

Cuadro A5.1 Resumen de los elementos configurados en los modelos WEAP-PLAN (original) y WEAP-DTF (usado en este estudio) y principales comentarios.

Elementos WEAP	WEAP-PLAN	WEAP-DTF	Observaciones
Nodos de cuenca	52	0	
Nodos demanda doméstica	5	6	Se incluye unidad de demanda en el sector no regulado
Nodos demanda de riego	62	47	Se agrupan en el sector no regulado y en el sector Chongoyape.
Nodos demanda industrial	2	2	
Nodos demanda minera	2	1	Se agrupa
Tramos de río	17	8	Se eliminan tramos de río en sector no regulado (cabecera de la cuenca)
Embalses	7	8	Se incluye Sican
Nodos de agua subterránea	6	6	
Enlaces de transmisión	94	80	
Elementos de canalización	21	21	

Los nuevos elementos incorporados en el modelo WEAP-DTF son:

- Nueva unidad de demanda de riego en el sector no regulado de la cuenca (*Upstream.SantaCruz*). Esta unidad de demanda no fue incluida en el modelo WEAP-PLAN a pesar de estar reconocida en el actual plan de cuenca. Esta unidad de demanda forma parte de la unidad *Upstream* que ha sido creada para incluir todas los nodos de demanda agraria del departamento de Cajamarca.
- Nueva unidad de demanda poblacional para el sector no regulado de la cuenca (*U.P. Upstream*) (Figura A5.2).
- Nueva unidad de demanda de riego ubicada en el sector no regulado de la cuenca y referente al sector de Chota (*Chota.Nueva*) (Figura A5.2).

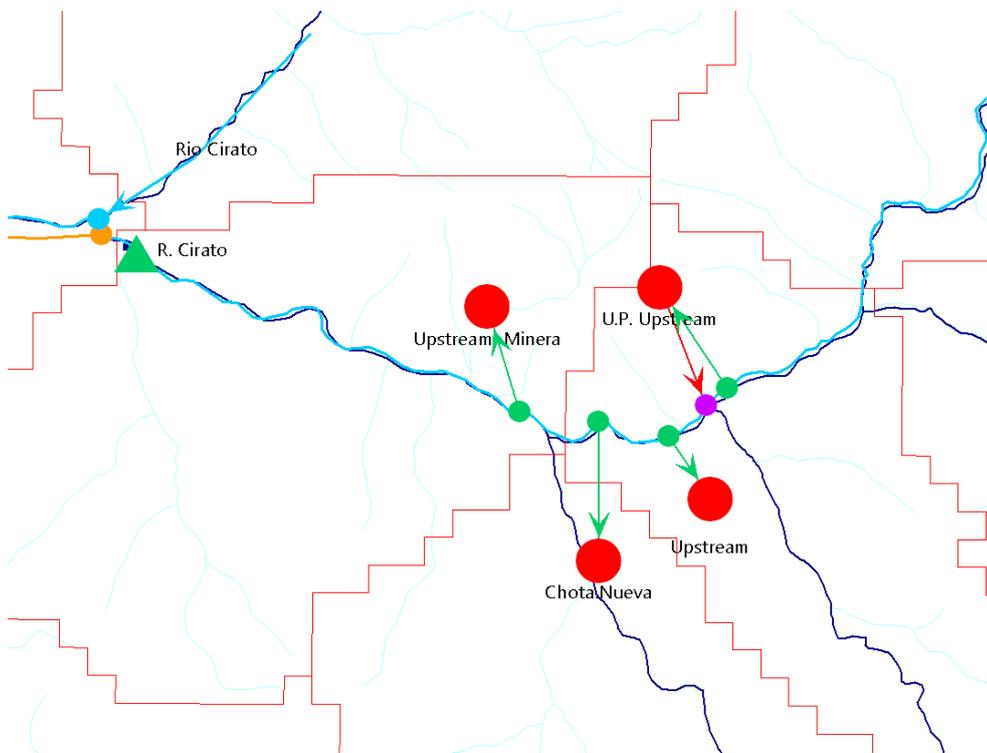


Figura A5.2 Modificaciones realizadas en el modelo WEAP en el sector no regulado de la cuenca.

- Presa de Sican, con canal de alimentación desde Tinajones y canal de desagüe en el canal del Taymi (Figura A5.3). Se muestran las principales características del sistema Sican en la sección A5.3

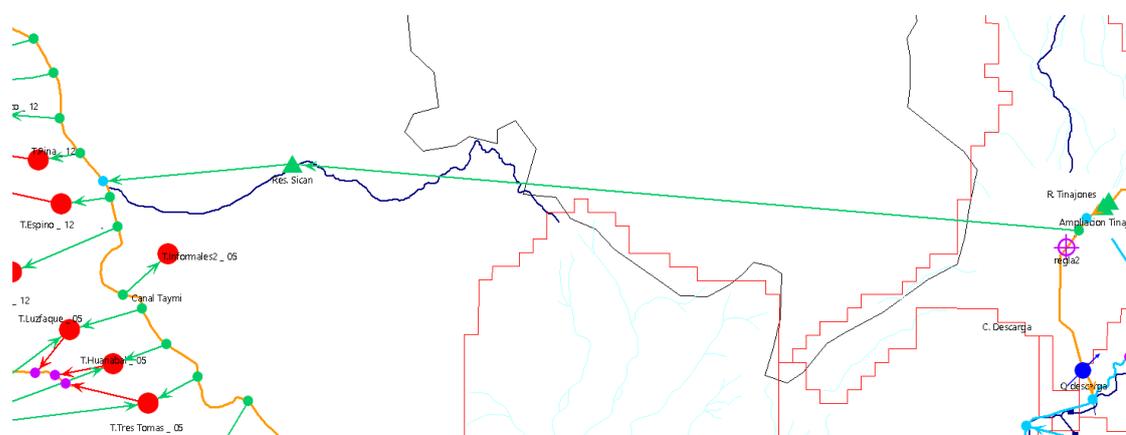


Figura A5.3 Sistema Presa Sican en WEAP-DTF.

Adicionalmente, se simplificó la estructura topológica del modelo en algunos de los sectores de la cuenca con el objetivo de: 1) optimizar: la integración del modelo WEAP con las simulaciones de caudal derivadas del modelo HydroBID, y 2) facilitar la ejecución de los escenarios de simulación climáticos y de demanda. Estas modificaciones consistieron:

- Eliminación de los 52 nodos de cuenca localizados en el sector no regulado de la cuenca. El modelo WEAP-DTF se fuerza con datos de caudal mensual simulados con HydroBID.
- Agrupación de los 8 nodos de demanda de riego localizados en el sector no regulado de la cuenca en un único nodo de demanda (*Upstream*) (Cuadro A5.2) y aumento del retorno de riego al sistema. Igualmente, y con el objetivo de alcanzar homogeneidad en las condiciones de simulación, se han modificado los valores del coeficiente de pérdidas desde el 60% el modelo WEAP-PLAN hasta considerarse nulo en el modelo WEAP-DTF (igual que en el resto de los nodos de riego del sistema regulado), y el coeficiente de consumo desde el 100% en el modelo WEAP-PLAN hasta el 90% en el WEAP-DTF, devolviéndose la diferencia como retorno de riego al sistema).
- Agrupación de los nodos de demanda de riego con toma directa del río Chancay y localizados en el sector de Chongoyape en dos nodos de demanda (*Ch01* y *Ch02*). En la Figura A5.4. se muestra los cambios realizados en la topología del modelo.

Cuadro A5.2 Listado de unidades de demanda de riego que han sido agrupadas en nuevos nodos en el modelo WEAP-DTF.

Modelo WEAP-DTF (utilizado en Fase III y IV)	Modelo WEAP-PLAN (original Plan Hidrológico)
<p>Upstream</p> <p>Se incluye nodo de riego del subsector Santa Cruz (<i>Upstream.SantaCruz</i>)</p> <p><i>Coef. de pérdidas: 0%</i> <i>Coef. de consumo: 90% (con retorno de riego)</i></p>	<p>Subsector SantaCruz Subsector Catache Subsector ChancayBaños Subsector Chugur Subsector Huambos Subsector LaEsperanza Subsector Nimabamba Subsector SanMiguel</p> <p><i>Coef. de pérdidas: 60%</i> <i>Coef. de consumo: 100% (sin retorno de riego)</i></p>
<p>Ch01</p>	<p>Ch.Carniche Ch.Huanabal Ch.Huaca_Blanca Ch.Santa_Rosa Ch.La_Ramada</p>
<p>Ch02</p>	<p>Ch.Guayaquil Ch.Las_Minas Ch.Vega_Tabacal1 Ch.Vega_Tabacal2 Ch.Cuculi Ch.Homero Ch.El_Palmo</p>

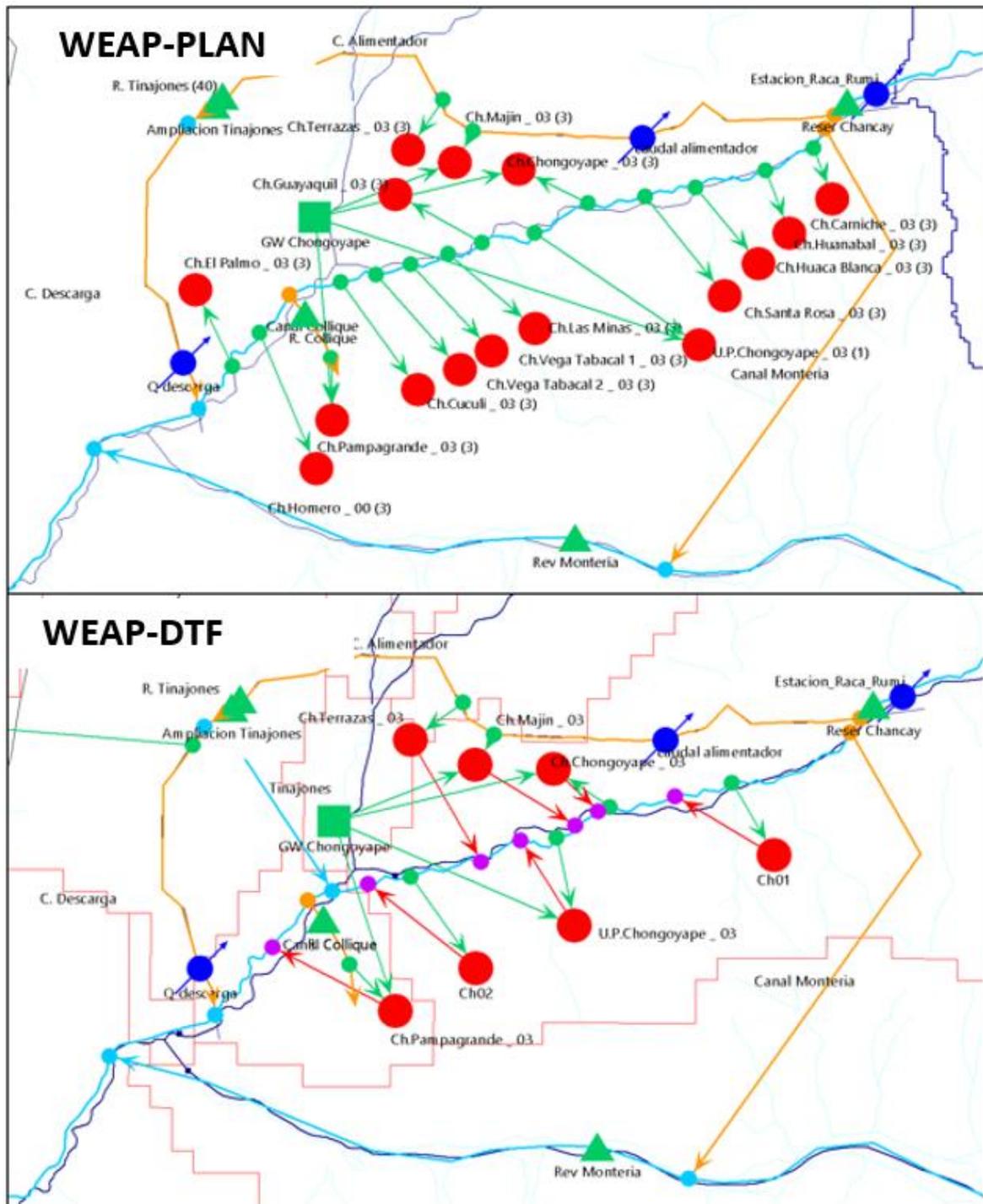


Figura A5.4. Diferencias entre el modelo WEAP-PLAN y WEAP-DTF en el sector medio de la cuenca (cabecera del sistema regulado). Nótese la agrupación de los nodos de demanda de riego no dependientes de aguas subterráneas en el corredor del río Chancay.

A5.2 Incremento de demanda de agua doméstica en el periodo de simulación (1989 – 2018, 30 años)

Para el cálculo de la demanda de agua para uso doméstico en los 6 nodos configurados en el modelo WEAP-DTF se ha asumido una tasa de crecimiento anual del 2.25% sostenida durante el periodo de simulación (30 años) y hasta alcanzarse un aumento del 68% respecto del año base. Esta tasa de crecimiento anual coincide con la adoptada en el actual PGRH para el periodo 2013-2035.

A5.3 Sistemas de regulación Sican y La Montería.

En el Cuadro A5.3 y Cuadro A5.4 se detallan las principales características de los sistemas de regulación de Sican y La Montería.

Cuadro A5.3 Principales características estructurales y funcionales de los Sistemas Sicán y La Montería.

Infraestructura	Sican	La Montería
Capacidad máxima de almacenamiento (MMC)	50.56	77.0
Volumen Útil (Mm3)	37	
Descarga hidráulica máxima (m3/s)	39	
Coef. de amortiguación (Mm3)	0.6	0.1
Evaporación neta (mm)	Igual que la Montería	MonthlyValues(Jan, 60.075, Feb, 34.598, Mar, -2.166, Apr, 62.227, May, 75.298, Jun, 68.555, Jul, 79.559, Aug, 84.783, Sep, 88.392, Oct, 95.886, Nov, 91.166, Dec, 83.572)
Límite Zona Inactiva (Mm3)	8.36	5
Límite Zona de Amortiguación (Mm3)	18.144	21
Límite Zona de Conservación (NAMO) (Mm3)	45.36 (8.36+37)	77.0
Prioridad de llenado	40	40
Canal de alimentación - Caudal máximo circulante (m3/s)	7	20
Canal de descarga - Caudal máximo circulante) (m3/s)	39	No aplicable

Cuadro A5.4 Curva Característica de volumen de embalse para el Sistema Sican y La Montería. Valores adoptados en el modelo WEAP-DTF

	Sican*		Monteria**	
	Volumen (MMC)	Altitud (m)	Volumen (MMC)	Altitud (m)
1	0	94	0	184
2	8.36	108	0.028	186
3	45.36	120.45	0.292	190
4	50.56	122.20	0.955	194
5			2.192	198
6			4.276	202
7			8.011	206
8			14.652	210
9			24.946	214
10			38.948	218
11			56.566	222
12			77.605	226

* Diagrama Sección de la Presa Sican, pp. 18. En ATASA (2014). *Instalación del sistema hidráulico Sican para mejorar el sistema de riego en el Valle Chancay-Lambayeque, Departamento de Lambayeque. Estudio a nivel de perfil.* Informe principal, 4º informe. Proyecto Especial Olmos-Tinajones, Gobierno Regional de Lambayeque

** Tabla 5 (alternativa 2B), pp. 60. En Ofiteco (2012). *Instalación de la presa del embalse de La Montería y obras conexas en el distrito de Chongoyape, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque. Estudio Básico 4. Diseños Hidráulicos.* Consultoría para la formulación del estudio de pre-inversión a nivel de perfil del proyecto, 3er informe. Proyecto Especial Olmos-Tinajones, Gobierno Regional de Lambayeque.

A5.4 Integración del modelo WEAP-DTF con el modelo HydroBID

La integración del modelo WEAP-DTF y el modelo HydroBID se logró mediante la incorporación de los caudales de descarga simulados por HydroBID en las cinco subcuencas ilustradas en la Figura A5.5. Para el caso de las subcuencas *Chancay-Cabecera* y *Río Tablazo (Montería)* los caudales simulados por HydroBID fueron ingresados directamente en el modelo WEAP-DTF. El caudal de cabecera aportado por las tres subcuencas restantes (*Cirato-Chancay*, *Maychil-Chancay* y *Tinajones-Chancay*) fue calculado a partir de los caudales simulados por HydroBID en las confluencias de cada subcuenca (Figura A5.5, Cuadro A5.5).

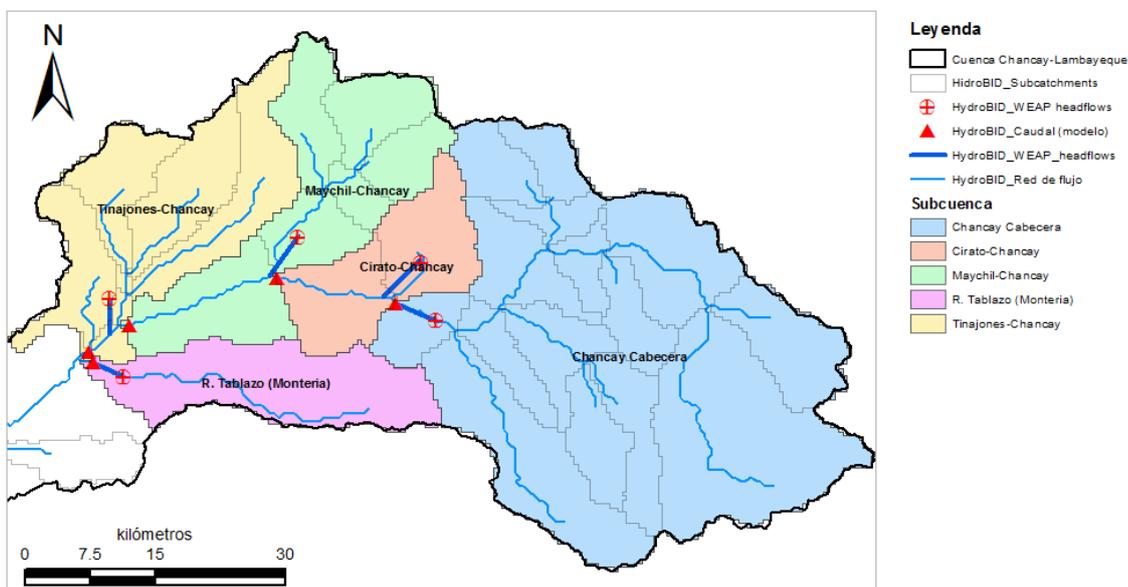


Figura A5.5 Esquema espacial donde se muestra la conexión WEAP-HydroBID. Nótese que para la ejecución del modelo WEAP-DTF se estimaron los valores de caudal de cada subcuenca (círculo con cruz roja) a partir de los datos de caudal simulados por el modelo HydroBID en cada una de las confluencias de cada subcuenca (triángulos rojos).

Cuadro A5.5 Estimación de caudales de cabecera en las subcuencas empleadas para la conexión HydroBID-WEAP.

Subcuenca	Punto de descarga/caudal (caudal HydroBID)	Caudal en cabecera (entrada en WEAP-DTF)
Chancay-Cabecera	previo a Tunel Carhuaquero (caudal Q1)	= Q1
Cirato-Chancay	Previo a confluencia con R. Maychil (caudal Q2)	= Q2 – Q1
Maychil-Chancay	Previo a confluencia con R. Tinajones (caudal Q3)	= Q3 – Q2
Tinajones-Chancay	Salida R. Chancay (previo a confluencia con R. Tablazo) (caudal Q4)	= Q4 – Q3
R. Tablazo (Montería)	Salida Rio Tablazo (caudal Q5)	= Q5

A6 Generador de Clima

A6.1 Descripción general

El generador estocástico de tiempo meteorológico está diseñado para crear un conjunto de datos de series temporales sintéticas de las variables climáticas que se utilizan para explorar exhaustivamente los efectos de las condiciones climáticas sobre el desempeño del sistema de cuencas del río. Las series temporales sintéticas del generador de tiempo meteorológico proporcionan una evaluación mucho más sistemática y detallada de los impactos del cambio climático que se proporcionarían en el típico análisis de proyección de clima de arriba hacia abajo tomando en cuenta la variabilidad natural y los posibles cambios futuros en la media y extremo climáticos.

El generador de tiempo meteorológico es totalmente prospectivo. Aplica los factores de cambio a las realizaciones climáticas sintéticas, mientras que preserva las estadísticas climáticas históricas tales como la media, la desviación estándar y la correlación serial de las variables climáticas. Hay pocas suposiciones que no pueden ser variadas. La mayor suposición es que las condiciones históricas están representadas claramente por los datos históricos observados, y que el cambio climático está expresado consistentemente sobre la región de interés. Podemos ilustrar el proceso de generación de tiempo meteorológico en tres fases (Figura A6.1).

En la *Fase I*, el objetivo es producir simulaciones estocásticas de la precipitación anual histórica sobre la región de estudio (en este caso, la cuenca Chancay-Lambayeque). El proceso inicia con la obtención de una serie temporal de precipitación anual promediada por área de los registros históricos disponibles. Luego se aplica un Modelo Auto Regresivo de Ondículas (WARM, por sus siglas en inglés) sobre la precipitación anual promediada espacialmente para obtener realizaciones sintéticas de la precipitación histórica. El procedimiento WARM primero descompone la serie anual en señales de baja frecuencia significativas y el término de error residual (ruido/estática). Cada señal de baja frecuencia y el error residual luego son simulados estocásticamente utilizando modelos lineales auto regresivos (AR). Finalmente, la baja frecuencia y los componentes de ruido/estática simulados son sumados para obtener las series representativas simuladas de la precipitación anual (para más detalles, ver Kwon et al. 2007).

En la *Fase II*, la serie de precipitación anual simulada se desagrega en tiempo y espacio para obtener la precipitación y temperatura diaria en todas las ubicaciones en el sistema. Esto es realizado desagregando primero la precipitación anual a mensual utilizando el "método de los fragmentos" (Silva y Portela 2012). Luego se utiliza un algoritmo de remuestreo de tipo k-nearest neighbors (k-elemento más próximo, KNN, por sus siglas en inglés) para desagregar posteriormente las series de precipitación mensual en valores diarios para todas las variables climáticas (tales como precipitación y mínimo, máximo, y temperatura promedio), mientras que se conservan las características climáticas espacial y temporal. Al final de la *Fase II*, se obtienen nuevas secuencias de realizaciones climáticas que sirven como muestra de la variabilidad histórica.

En la Fase III, se hace la variación de las realizaciones climáticas diarias, multi-sitio y multivariable para simular un amplio rango de cambios climáticos futuros. Esta es la fase final del generador estocástico de tiempo meteorológico, donde se perturban las estadísticas subyacentes de las realizaciones climáticas para explorar un rango de cambios en las variables climáticas. Esto normalmente se realiza aplicando factores de adición a las variables de temperatura y factores de multiplicación a la precipitación. Para las variables de temperatura, se impone un incremento lineal perturbando gradualmente la temperatura, empezando a 0°C (sin cambios) y terminando al nivel del incremento de temperatura especificado (por ejemplo, 4 °C). De manera similar, para la precipitación, se impone un incremento lineal perturbando la precipitación desde el 100% al nivel deseado de cambio (por ejemplo, 80%).

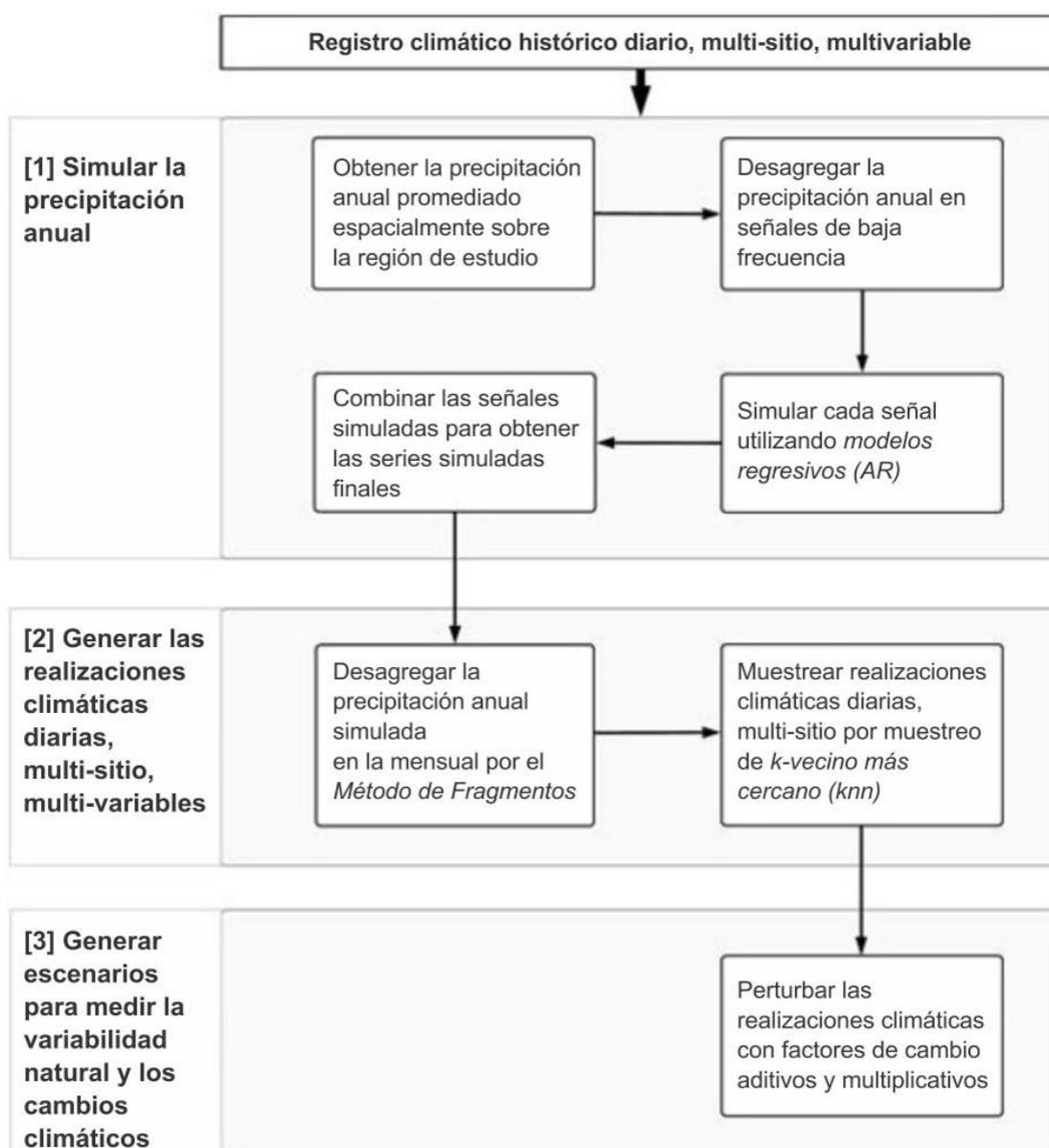


Figura A6.1 Diagrama de flujo del generador estocástico de tiempo meteorológico utilizado en el estudio de Chancay-Lambayeque

A6.2 Implementación para la vertiente Chancay-Lambayeque

Para generar los datos climáticos sintéticos para la cuenca Chancay-Lambayeque, primero definimos un período climático histórico para condicionar el generador de tiempo meteorológico.

Considerando la disponibilidad de datos (la cobertura espacial y temporal de los registros climáticos históricos), identificamos un período histórico de 1987-2010 utilizando las mismas estaciones meteorológicas representadas en la Sección X. Los datos utilizados para el generador de tiempo meteorológico vienen de las mismas estaciones introducidas anteriormente en la Sección 5.

Evaluamos el rendimiento del generador de tiempo meteorológico basado en su habilidad para replicar las estadísticas del período climático histórico (1980-2011). Para este propósito, obtenemos cinco realizaciones estocásticas aleatorias del generador de tiempo meteorológico y comparamos las estadísticas de los datos climáticos históricos utilizados para condicionar el generador de tiempo meteorológico. Las estadísticas utilizadas para la comparación incluyen el espectro energético (variabilidad de baja frecuencia) de la precipitación anual, media mensual a largo plazo y la desviación estándar de la precipitación y la temperatura, y finalmente la media diaria y la desviación estándar de las variables de precipitación y temperatura.

La Figura A6.2 muestra el espectro energético de las cinco realizaciones estocásticas de precipitación anual. La señal energética media de las series estocásticas (línea negra) coincide muy bien con el espectro energético de la precipitación anual histórica (línea azul) con una elevación en el período de 5-7 años, que corresponde aproximadamente a la señal ENSO observada en la región costera del Perú. Los resultados también muestran que el espectro observado está dentro del rango del espectro simulado (marcado con la banda gris) para períodos de duración de hasta 10 años. La Figura A6.2 muestra que las realizaciones sintéticas no capturan la periodicidad observada a aproximadamente 12-14 años (línea azul). Sin embargo, se considera como conforme debido a la relativa corta duración del registro histórico de únicamente 23 años.

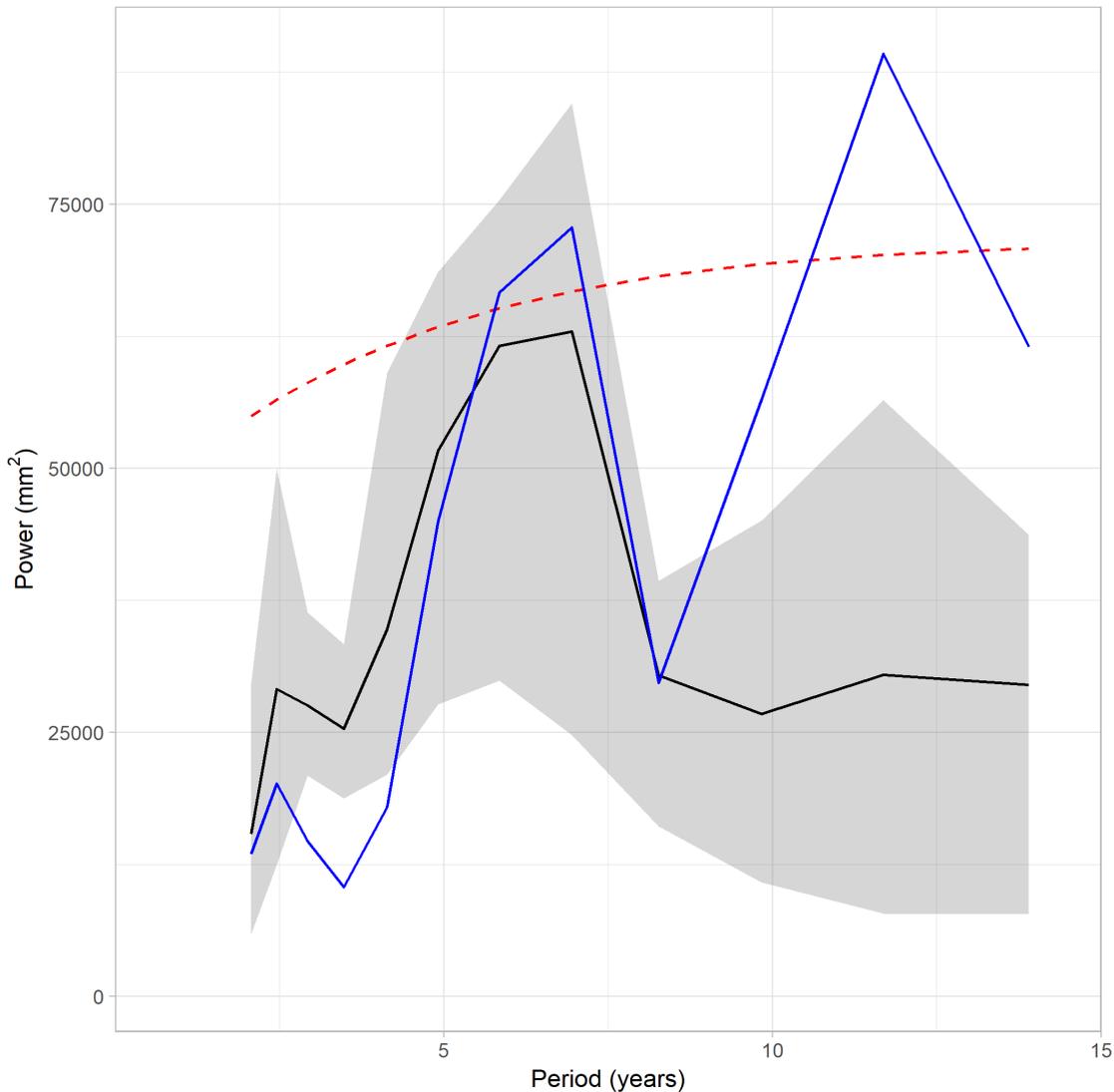


Figura A6.2 Espectro energético global para la precipitación anual. El espectro observado (azul) se compara con el espectro energético medio (negro) de las 5 realizaciones, junto con el rango de todas las realizaciones (gris). También se muestran el nivel de significancia de 95% (línea punteada roja). El espectro energético de las observaciones y simulaciones se vuelven significativos estadísticamente si se elevan por encima de la línea punteada roja.

En la Figura A6.3 se compara los valores promedio de precipitación y temperatura mensual de las realizaciones estocásticas generadas. Los valores promedio de precipitación observados (Figura A6.3 a) están dentro del rango de los valores simulados, sin embargo, la coincidencia entre los dos conjuntos de datos varía según el mes del año. Una comparación similar también se muestra para los valores promedio de temperatura mensual observándose un buen ajuste del modelo (Figura A6.3 b).

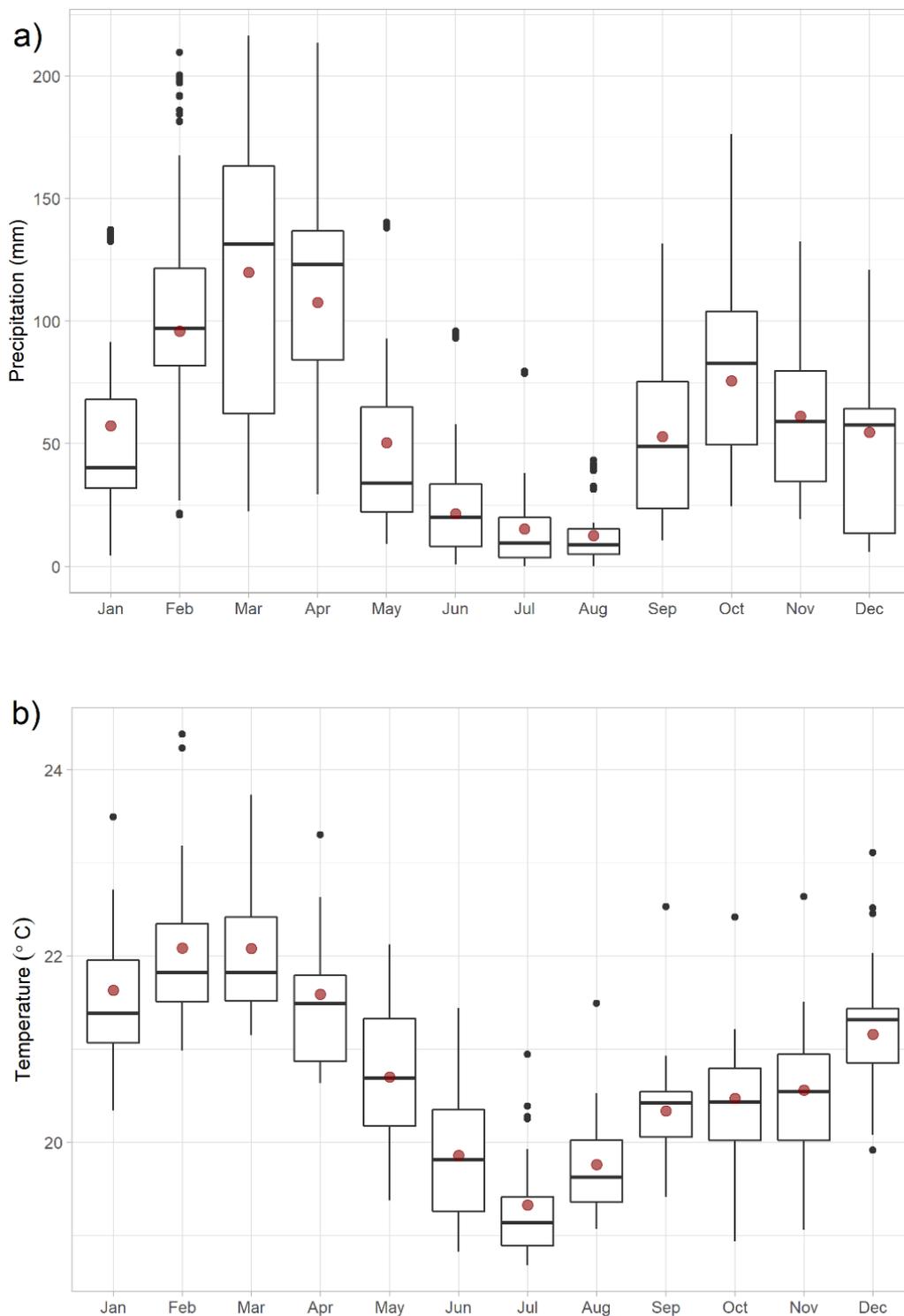


Figura A6.3 Diagrama de recuadros de los valores promedio mensuales de las variables climáticas de las realizaciones estocásticas: a) Precipitación (mm), b) Temperatura (°C). La precipitación media mensual histórica se muestra con la línea punteada azul. Los resultados muestran los valores promediados espacialmente a lo largo de las estaciones meteorológicas.

Posteriormente, examinamos las estadísticas primeras y más altas para las variables climáticas diarias simuladas a lo largo de todas las estaciones. La figura A.8-a muestra la media y la desviación estándar de las cantidades de precipitación diaria superiores a cero. Para esta evaluación, encontramos los valores medios sobre las cinco realizaciones estocásticas y las comparamos con las estadísticas del período de análisis histórico subyacente. Los resultados sugieren un muy buen rendimiento con respecto a la media de precipitación, y un rendimiento generalmente bueno para la desviación estándar de precipitación. De manera similar, la Figura A.8-b muestra la media y la desviación estándar de las temperaturas diarias promedio computadas desde los resultados principales de cinco realizaciones estocásticas. Las medias diarias de la temperatura promedio coinciden muy bien con los valores históricos. Tanto para las variables de precipitación como de temperatura, no detectamos ninguna polarización sistemática en las secuencias sintéticas.

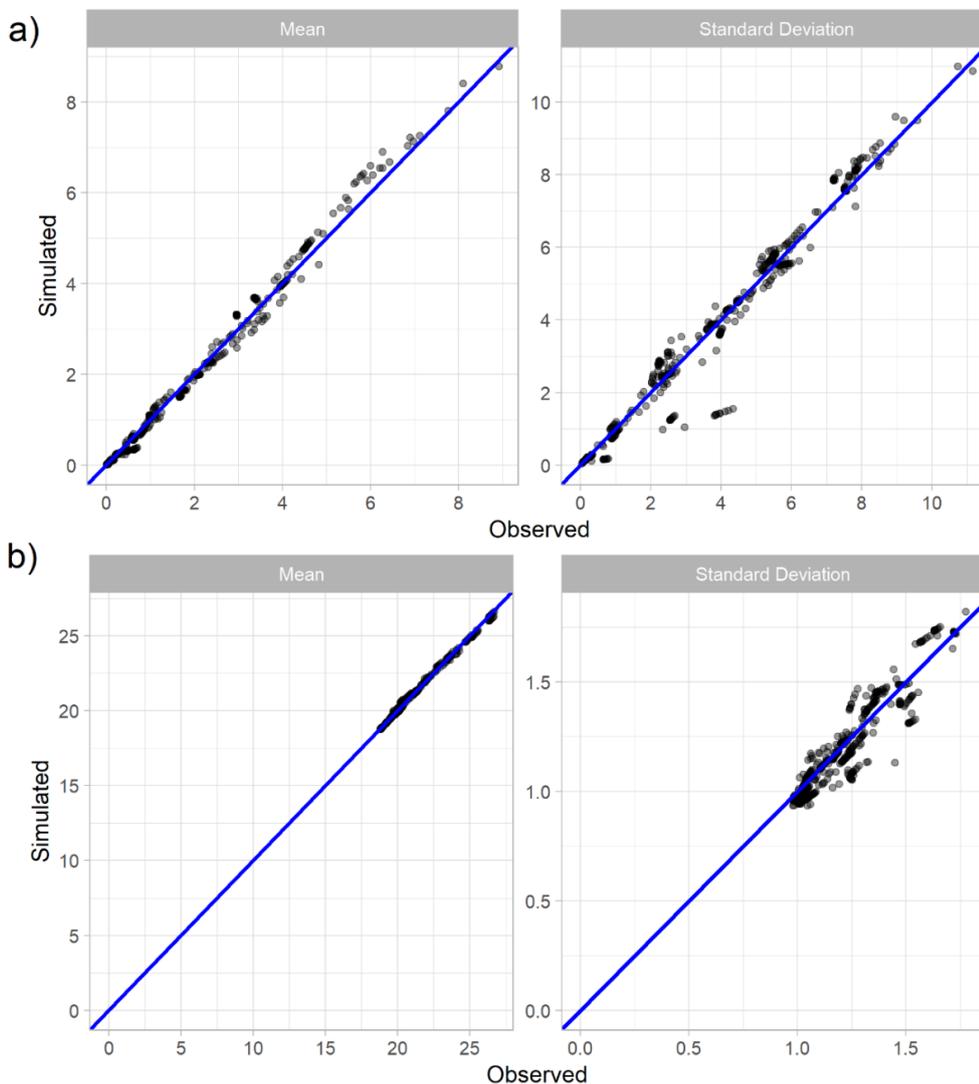


Figura A6.4 Estadísticas de rendimiento diario para a) precipitación diaria (mm), b) temperatura diaria (°C). Cada punto muestra todas las posibles combinaciones de estaciones de medición (9 en total) y los meses comparando los valores históricos con los valores medios a lo largo de cinco realizaciones estocásticas. En cada trazo, las líneas diagonales (pendiente=1 e intercepto=0) se muestran en color azul.

Finalmente, también evaluamos el rendimiento del generador meteorológico en términos de replicación de eventos extremos. Para este propósito, primero identificamos los 500 eventos de precipitación diaria más extremos de todas las ubicaciones y cada uno de los cinco eventos climáticos sintéticos. Luego comparamos estos eventos extremos con los 500 principales eventos de precipitación diaria extrema de los datos históricos para ver si el generador meteorológico produce resultados comparables.

La Figura A.9 muestra que las series sintéticas del generador meteorológico pueden simular bastante bien la precipitación extrema en los datos históricos. En una escala diaria, las cinco realizaciones sintéticas tienen eventos extremos de precipitación que exceden el valor diario máximo en el período de observación histórica, que fue de aproximadamente 86 mm / día

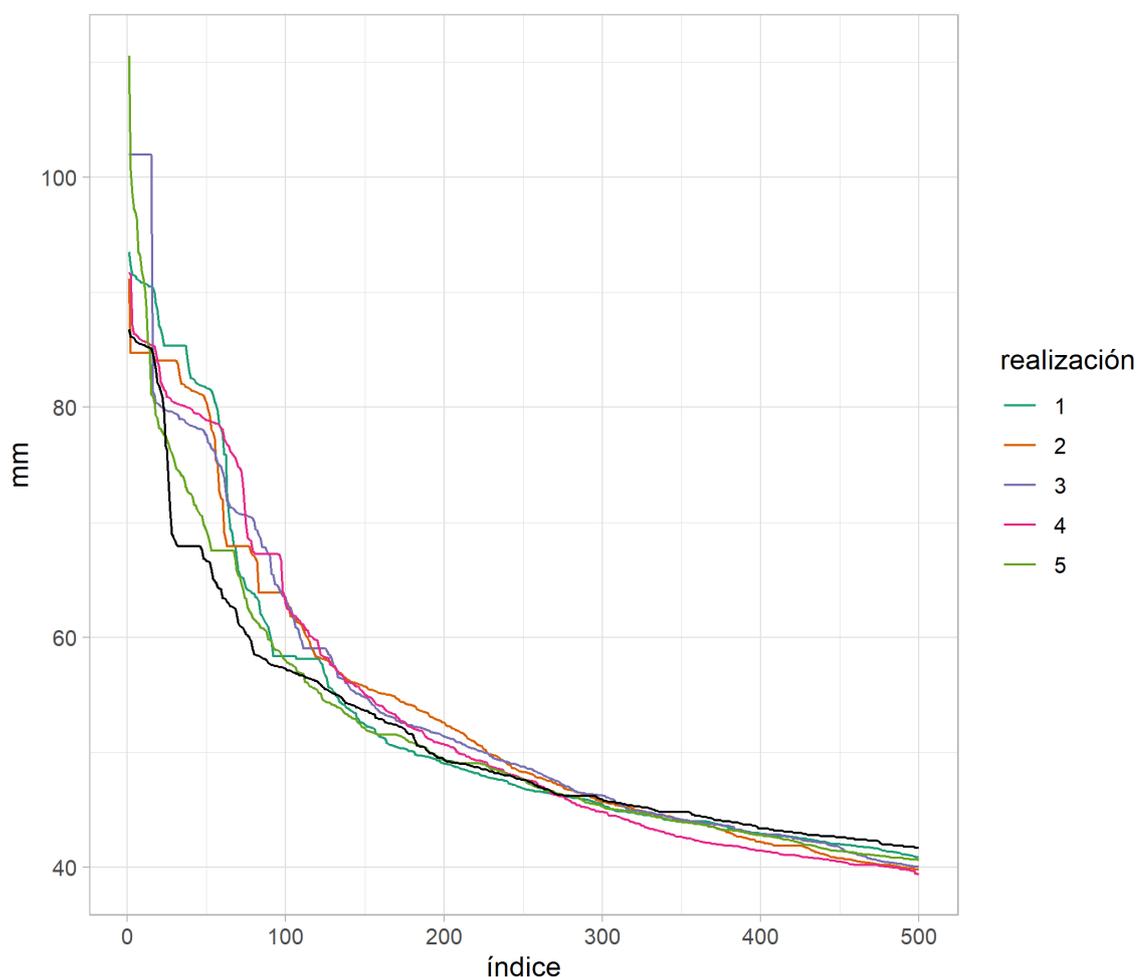


Figura A.9 Los 500 principales eventos de lluvia diaria severa en el registro histórico (línea negra) vs. las cinco realizaciones sintéticas obtenidas del generador meteorológico. En la figura, los ejes x e y muestran la clasificación (1 a 500) y la magnitud asociada del evento de lluvia diaria.

A7 Infraestructura Natural: Metodología para análisis de impactos y costo-efectividad.

A7.1 Asignación del Número de Curva a nivel de subcuenca.

La simulación del impacto hidrológico de la infraestructura natural y de las intervenciones en la infraestructura natural se realizó a través de cambio de cobertura vegetal. En el modelo HydroBID (ver Apéndice A5 para una descripción detallada), la cobertura vegetal, en interacción con el tipo de suelo, controla el número de curva (NC) y la tasa de evapotranspiración real/potencial (ETR/ETP). La asignación del tipo de cobertura vegetal resulta clave para simular el impacto de las actuaciones en Infraestructura Natural. En el Método del número de curva del SCS, la ausencia o degradación de la cobertura vegetal está asociado valores altos del número de curva dando lugar a la reducción de la infiltración de agua en el suelo y el aumento de la escorrentía superficial. La asignación del número de curva se realiza a partir de valores tabulados según el tipo de cobertura. En el presente estudio, se ha empleado el mapa nacional de cobertura vegetal del MINAM (2015) para la identificación de los números de curva (Figura A7.1 y Cuadro A7.1). En el proceso de asignación del número de curva, se consideraron las zonas urbanas, de minería, agricultura costera y andina, y el matorral arbustivo como áreas fuertemente degradadas y por tanto con elevados números de curva (ver Harden, 1996 o la nota descriptiva del estudio de uso de suelo actual de la ZEE Cajamarca) (Cuadro A7.2). Finalmente, y debido a que HydroBID se ejecuta a escala de subcuenca, se estimaron los valores del NC para cada subcuenca de la región de estudio mediante el promediado ponderado por superficie de cobertura (Figura A7.2). En la Figura A7.3 se representan los valores de evapotranspiración real promedio estimados por subcuenca a partir del modelo HydroBID previamente calibrado y validado para la cuenca (Apéndice A3).

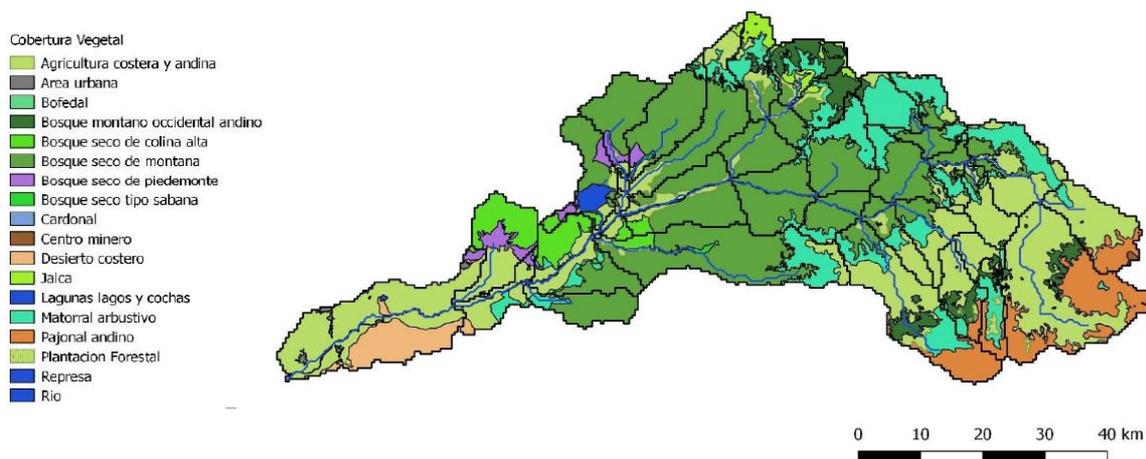


Figura A7.1 Mapa de clases de cobertura vegetal en la cuenca Chancay-Lambayeque (MINAM, 2015)

Cuadro A7.1 Asignación del tipo de cobertura vegetal en HydroBID a partir de los tipos de cobertura vegetal del MINAM (2015).

Tipo de Cobertura Vegetal, MINAM	Area (Ha)	Area (% de la cuenca)	Asignacion en HydroBID (NLCD)	
			Tipo de Cobertura Vegetal	NLCD -ID
Agricultura costera y andina	124 975	30,7%	Dryland cropland and pasture	2
Area urbana	1 341	0,3%	Urban and Built-Up Land	1
Bofedal	124	0,0%	Herbaceous Wetland	17
Bosque montano occidental andino	15 356	3,8%	Evergreen broadleaf forest	13
Bosque seco de colina alta	14 824	3,6%	Savanna	10
Bosque seco de montana	141 791	34,9%	Savanna	10
Bosque seco de piedemonte	5 644	1,4%	Savanna	10
Bosque seco tipo sabana	1 016	0,2%	Savanna	10
Cardonal	155,4	0,0	Dryland cropland and pasture	2,0
Centro minero	236	0,1%	Urban and Built-Up Land	1
Desierto costero	10 366	2,6%	Bare Ground Tundra	23
Jalca	4 779	1,2%	Mixed Shrubland/Grassland	9
Lagunas, lagos y cochas	127	0,0%	Water Bodies	16
Matorral arbustivo	56 147	13,8%	Dryland cropland and pasture	2
Pajonal andino	26 143	6,4%	Mixed Shrubland/Grassland	9
Plantacion Forestal	7	0,0%	Evergreen broadleaf forest	13
Represa	1 873	0,5%	Water Bodies	16
Rio	1 605	0,4%	Water Bodies	16
Grand Total	406 510	100 %		

Cuadro A7.2 Asignación del tipo de cobertura vegetal en HydroBID a partir de los tipos de cobertura vegetal del MINAM (2015)

NLCD_ID	NLCD Description	Area Weighted Average CN
1	Urban and Built-Up Land	92.0
2	Dryland Cropland and Pasture	80.2
9	Mixed Shrubland/Grassland	64.7
10	Savanna	78.4
13	Evergreen Broadleaf Forest	70.8
16	Water Bodies	100.0
17	Herbaceous Wetland	70.0
23	Bare Ground Tundra	86.4

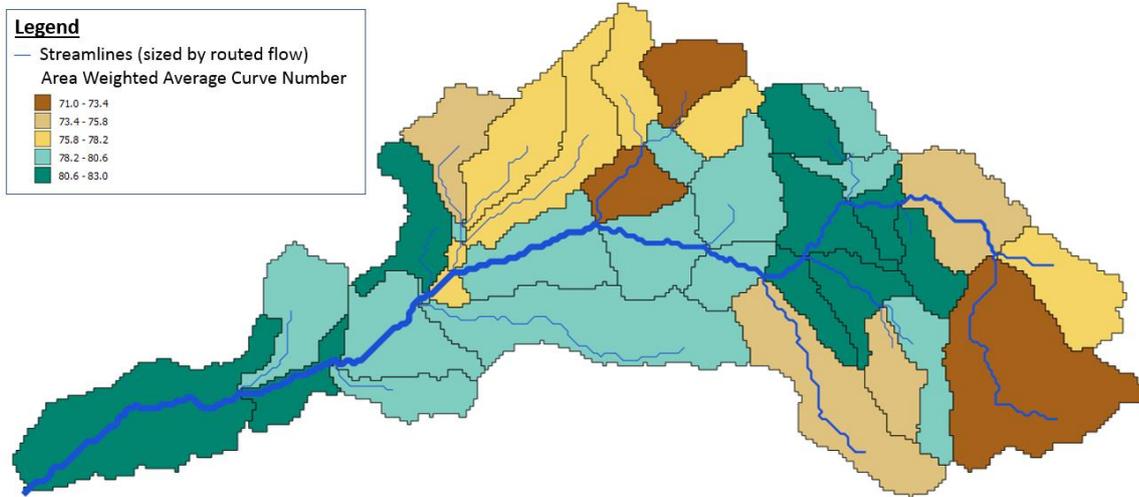


Figura A7.2 Valores promediados del Número de Curva a nivel de subcuenca.

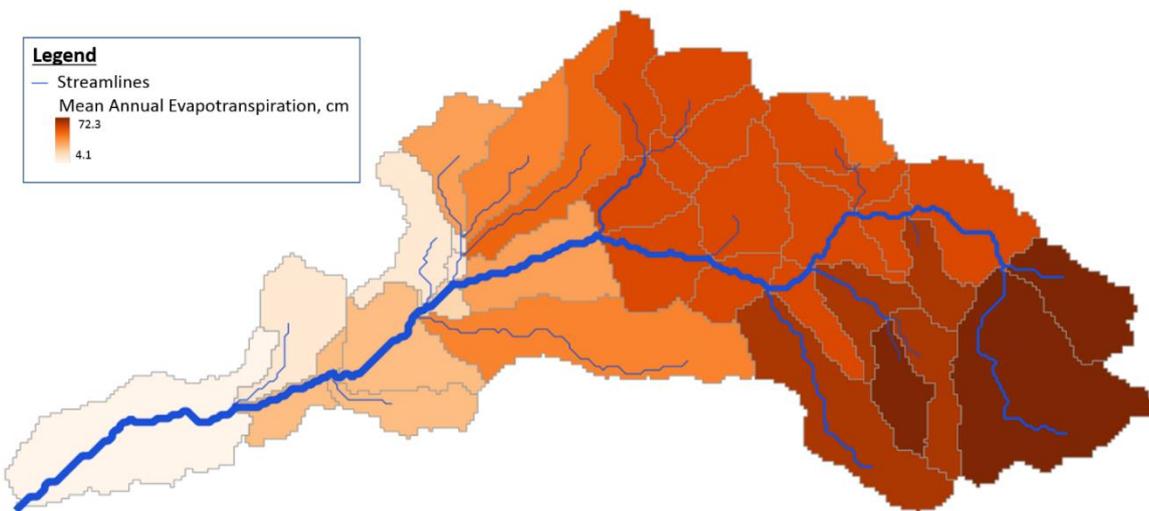


Figura A7.3 Evapotranspiración real promedio (cm/año) por subcuenca estimado por el modelo HydroBID.

A7.2 Simulación hidrológica de la línea de base para la Infraestructura Natural.

Durante la Prueba de Estrés Climático, la metodología DTF considera múltiples escenarios climáticos, y de demanda de agua vinculados a factores no climáticos. Durante la fase IV (Gestión del Riesgo Climático), la efectividad de una intervención para amortiguar las incertidumbres climáticas se evalúa en comparación con un escenario o línea de base que describe la trayectoria esperada por los factores no climáticos.

En presente estudio, la cobertura vegetal que actualmente predomina en la cuenca Chancay-Lambayeque (Figura A7.1), y que ha sido usada para la calibración y validación del modelo HydroBID, se ha considerado como la línea de base para la Prueba de Estrés Climático. Este escenario asume pues una trayectoria de conservación (no degradación o degradación evitada) de la actual matriz paisajística.

A7.3 Simulación hidrológica del impacto de la infraestructura natural bajo escenarios de no degradación (degradación evitada) y degradación de la matriz de paisaje.

Durante la ejecución de la Fase IV se pueden considerar dos escenarios de evolución de la cubierta vegetal para el periodo de simulación (Figura A7.4). El primer escenario asume las que las actuaciones de manejo sostenible y restauración de la Infraestructura Natural se ejerce sobre escenario de no degradación de la cubierta vegetal (línea de base). El segundo escenario contemplaría la ejecución de la restauración sobre un escenario que asume la tendencia actual de degradación de la cuenca la cual está caracterizada por la reducción de superficie boscosa y pajonales en favor de la expansión agrícola y de actividades mineras. Comparar el escenario tendencial de degradación con la línea base permitiría estimar el impacto neto de mantener las actuaciones de manejo sostenible y mantenimiento de la vegetación natural (degradación evitada). En cambio, la comparación entre el escenario de restauración y la línea de base permitiría estimar el impacto neto de la restauración.

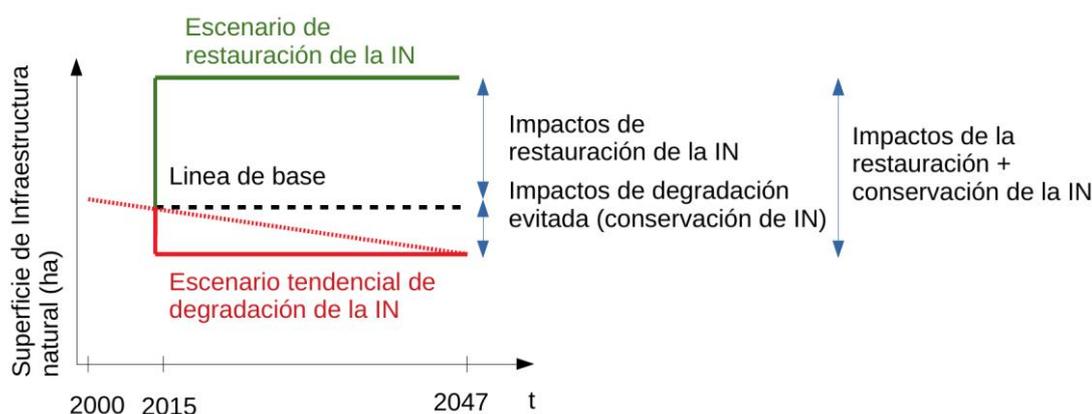


Figura A7.4 Esquema conceptual empleado para la evaluación del impacto de la Infraestructura Natural.

A7.4 Simulación hidrológica de la restauración de la Infraestructura Natural en la cuenca.

En este estudio se ha considerado un único proyecto de Infraestructura Natural que incluye un portafolio de actuaciones de manejo sostenible y restauración a implementar en un número limitado de subcuencas. El conjunto de estas actuaciones representa la muestra más costo-efectiva, en términos de aumento del flujo de baje en el periodo de estiaje, encontrada de entre todas las actuaciones identificadas como prioritarias por los agentes y autoridades locales⁵, y por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR).

⁵ Los actores/autoridades y proyectos locales son:

- Consejo de Recursos Hídricos y de Cuenca de Chancay-Lambayeque y Autoridad Nacional del Agua (Proyectos de mejoramiento ambiental mediante siembra y cosecha de agua, forestación y forestación de la cuenca de los ríos Chupicayacu, El Tuyo, Canramar, Los Chicos, Campaden, Tacamache, San Lorenzo, Cañad, Las Nieves)
- Proyecto Especial Olmos Tinajones (Programa de reforestación de la cuenca Chancay – Lambayeque con fines de conservación y protección de los recursos hídricos para el mejoramiento de su calidad y disponibilidad (2019))

Para definir el portafolio de actuaciones más costo-efectivas a nivel de cuenca, previamente se hizo un análisis detallado del impacto que supondría aplicar todas las actuaciones prioritarias de los planes locales y del SERFOR. Los mapas de actuación identificados por todas instituciones se combinaron oportunamente (Figura A7.6) y se cruzaron con el mapa actual de coberturas de la cuenca. La simulación de los cambios de uso de suelo para este plan queda reflejada en el Cuadro A7.3.

Cuadro A7.3 Matriz de cambio de cobertura y uso de suelo de la restauración simulada.

Cambio de cobertura y uso de suelo		Después de la restauración					Cobertura sin cambio	Total
		Bosque con especies nativas o exóticas	Uso sostenible del Bosque montano (evergreen broadleaf forest, improved CN)	Pajonal/ Jalca (mixed shrubland/ grassland)	Uso sostenible de Pajonal/ Jalca (Mixed Shrubland/Grassland, improved CN)	Bosque seco (savanna)		
Antes de la restauración	Actividad agropecuaria o matorral (Dryland Cropland and Pasture)	10494		706		4586		15786
	Bosque montano (Evergreen Broadleaf Forest)		1668					1668
	Pajonal/Jalca (Mixed Shrubland/Grassland)				13416			13416
	Bosque seco (Savanna)						42046	42046
	Cobertura sin cambio						256602	256602
Total		10494	1668	706	13416	4586	42046	256602
								72916

- Gobierno regional de Cajamarca (PIP «Recuperación del servicio ecosistémico de control de erosión de suelo en las comunidades campesinas de Tocmoche, Santiago de Cachén y San Juan de Licupis, provincia de Chota, región Cajamarca » & PIP « Recuperación del Servicio Ecosistémico de Regulación Hídrica en las sub cuenca del Río Llaucan y la Microcuenca del Río Perlamayo, Provincia de Hualgayoc, Región de Cajamarca)

En estas áreas, los actores locales El área de actuación queda reflejada en la Figura A7.5A.

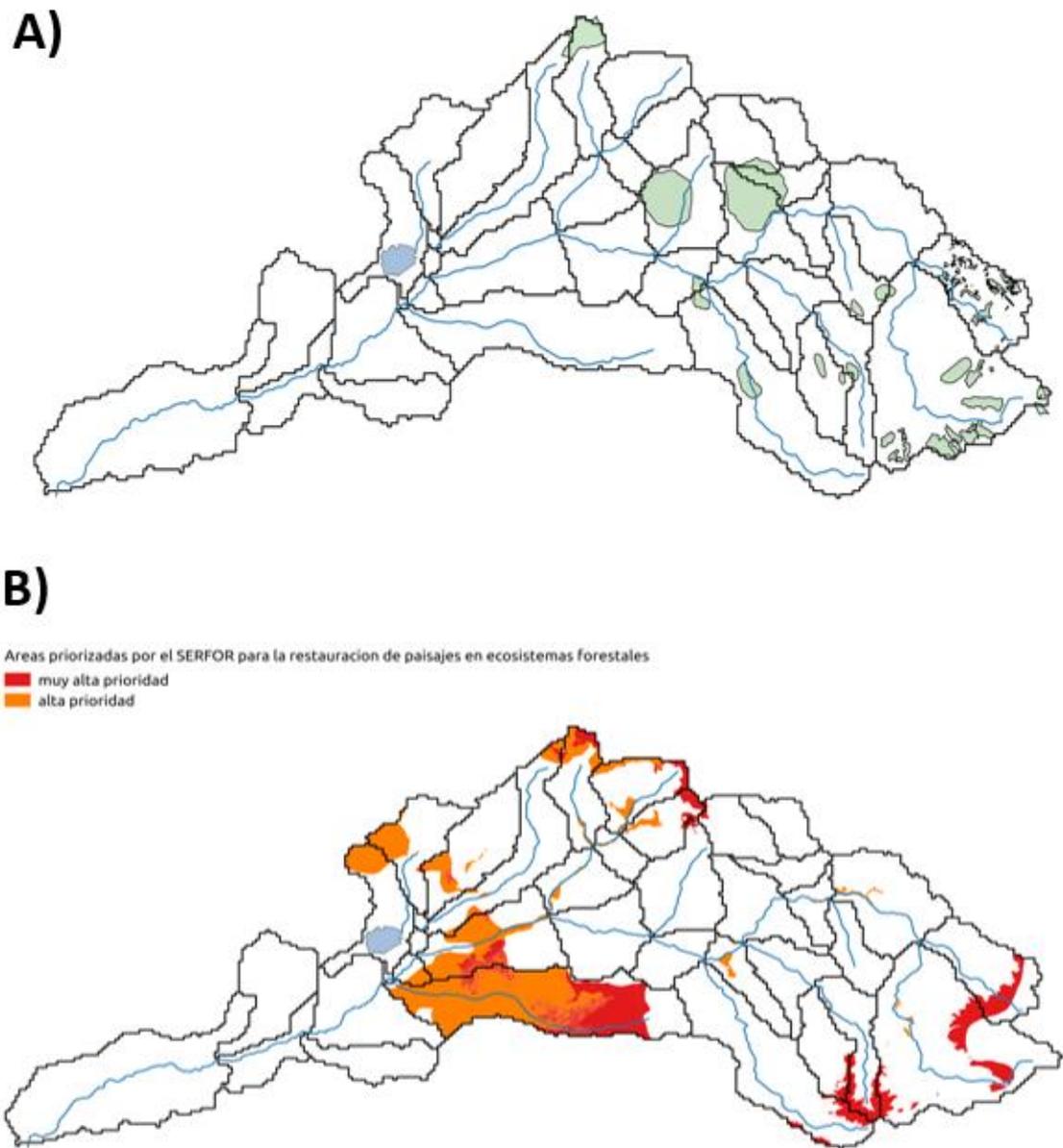


Figura A7.5 (A) Áreas priorizadas por los actores locales para la restauración principalmente mediante forestación con especies nativas y exóticas, y (B) Áreas priorizadas por el SERFOR para la restauración.

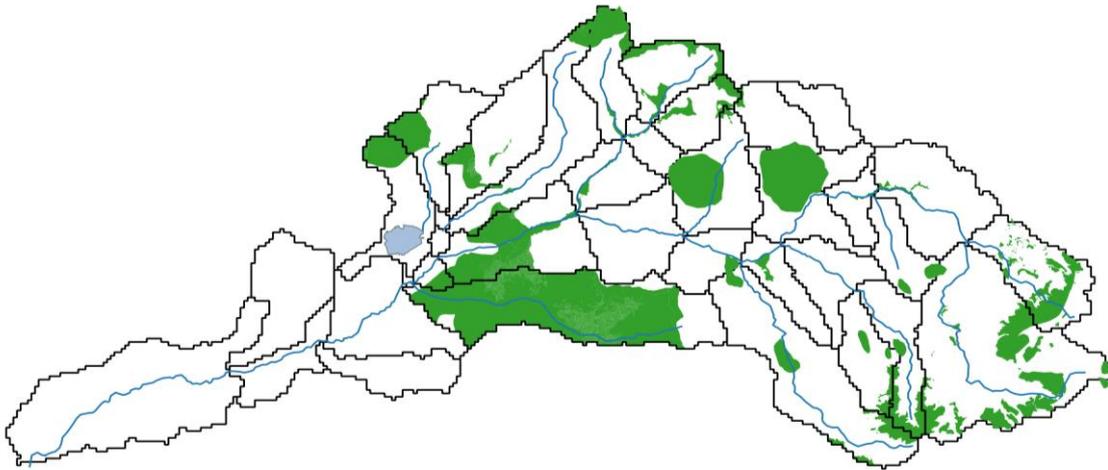


Figura A7.6 Áreas de actuación contempladas para el proyecto de restauración a gran escala.

Todas las actuaciones de restauración contempladas se han localizado en las áreas consideradas como degradadas (actividades agropecuarias o matorral andino) según el mapa de usos actual, y clasificadas como prioritarias en los planes de restauración. En aquellos casos se procede al cambio de la cobertura y el uso de suelo, mediante la reforestación con especies nativas o exóticas. Por debajo de los 2000 m.s.n.m., la restauración simula un cambio hacia un bosque seco, mientras que por encima de los 2000 m.s.n.m. hacia un bosque montano. En las áreas más altas, por encima de 3500 m.s.n.m., el cambio consistiría en la recuperación de los pajonales o jalca que es el ecosistema natural más extendido a estas altitudes. Finalmente, cuando las áreas prioritarias cubrían áreas identificadas como naturales (bosque seco, bosque montano o pajonales), se simuló un manejo sostenible de los ecosistemas existentes mediante, por ejemplo, la regeneración natural y la prevención de la tala en el caso de los bosques lo que permitiría asumir una reducción del número de curva (mejor infiltración).

La modelación del manejo sostenible de los ecosistemas naturales se realizó cambiando la condición hidrológica de estas áreas de “regular” a “buena”. Una buena condición hidrológica indica que el suelo generalmente tiene un bajo potencial de escorrentía para un grupo de suelo hidrológico específico, tipo de cubierta y tratamiento. Los números de curva utilizados para representar estas nuevas condiciones hidrológicas se derivaron de los valores sugeridos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos⁶.

Los impactos hidrológicos del portafolio máximo de restauración fueron simulados sin cambio en la serie climática histórica. Partiendo de los caudales totales durante la temporada de estiaje (junio-septiembre) obtenidos con el portafolio máximo de intervenciones, se calculó la tasa coste-efectividad por subcuenca como el ratio del costo de las intervenciones de infraestructura natural y el aumento en el caudal total con respecto a las condiciones actuales (PEN/m³). Los costes considerados incluyeron los costes de oportunidad más los costes de instalación, y de administración necesarios para la garantizar la viabilidad y sostenibilidad de la intervención (por ejemplo, costos de vigilancia para proteger áreas a conservar).

⁶ U. S. Department of Agriculture (USDA), 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55.*

No se consideraron los costes relativos a las actividades de cosecha de la producción de las intervenciones productivas (p.ej. frutos para la forestación con tara, hongos para la forestación con pinos, etc) dado que no se tomaron en cuenta los ingresos potenciales en el cálculo del coste-efectividad. La selección de las cuencas a incluir en el portafolio optimizado se hizo no solamente a partir de un criterio de coste-efectividad y de la magnitud del impacto hidrológico.

Las subcuencas que contribuyen con el 77% de los beneficios y con el 38% de los costes se seleccionaron como aquellas más costo-efectivas. En total se seleccionaron ocho subcuencas (Figura A7.7) representando un área total de actuación restauración de aproximadamente 7,000 hectáreas, y de manejo sostenible de ecosistemas naturales de aproximadamente 17,000 hectáreas. El coste total del programa para estas subcuencas ascendería a 4.65 millones de dólares por año. Considerando una tasa de descuento del 5% y un horizonte de 32 años, el coste actual neto del programa ascendería a 71 Mil. US\$.

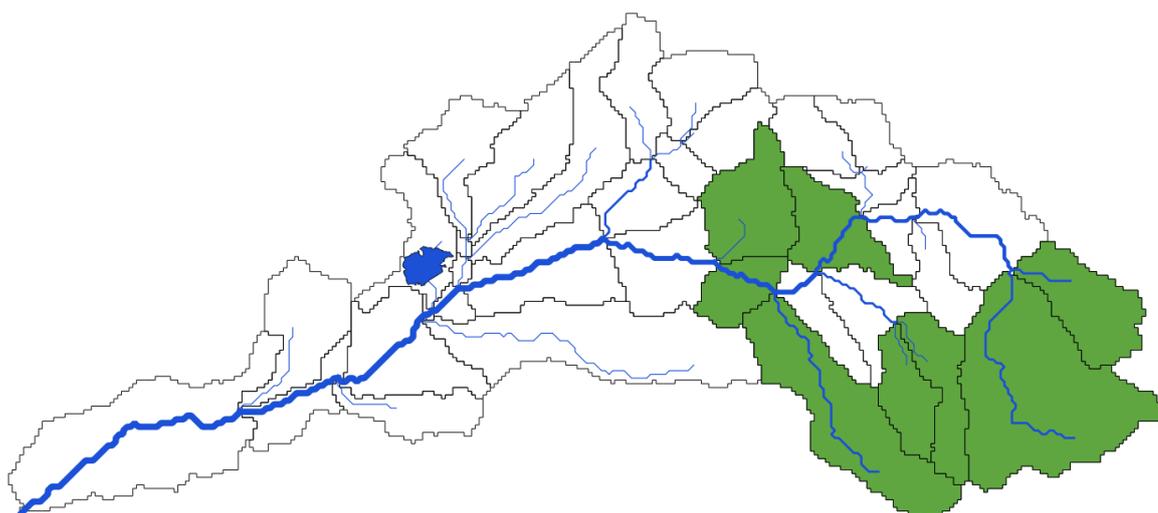


Figura A7.7 Subcuencas más costo-efectivas para el proyecto optimizado de restauración y manejo sostenible de la cobertura vegetal.

A8 Indicadores de desempeño por nodos de demanda.

Se presentan a continuación los valores de los tres indicadores de desempeño (confiabilidad, vulnerabilidad y resiliencia) evaluados para el sistema.

Cuadro A8.1 Valores de confiabilidad (%) por unidades de demanda y para el escenario de riego IRRIG-2035. Los valores del índice de desempeño hacen referencia a una media ponderada de todos los escenarios climáticos analizados y su probabilidad de ocurrencia según las proyecciones del proyecto CMIP5. Tipo = tipo de demanda (DOM = poblacional; IRR = riego; IND = industrial; MIN = minera)

Nodo de demanda (Modelo WEAP)	Tipo	BASE	AS	MO	MO-AS	IN	SI	SI-AS	SI-MO	SI-MO-AS
T.Sauce Talamo _12	IRR	52	60	53	62	51	52	62	54	63
T.Balazo _12	IRR	52	61	54	63	51	52	62	54	64
T.Pina _12	IRR	52	57	53	59	51	52	58	54	60
T.Espino _12	IRR	52	60	53	62	51	52	61	54	63
T.Sencie _12	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
T.Luzfaque _05	IRR	71	73	73	75	71	72	74	73	76
T.Huanabal _05	IRR	71	73	73	75	71	72	74	73	76
T.Informales2 _05	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
T.Tres Tomas _05	IRR	71	73	73	75	70	71	74	73	76
T.Carrizo Chuchicol _05	IRR	71	73	73	75	71	72	74	73	76
T.Fala Falita _05	IRR	71	73	73	75	71	72	74	73	76
T.San Miguel _05	IRR	71	73	73	75	71	72	74	73	76
T.Luya Chucupe _01	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
T.Tuman Jarrin _01	IRR	71	73	73	75	69	71	74	73	76
C.Sub Sector Mochumi _08	IRR	52	61	53	63	51	52	62	54	64
C.Sub Sector Muy Finca _11	IRR	52	55	53	57	50	52	56	54	59
E.Tabernas _00	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
E.Calupe _00	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
L.Santeno _02	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
E.La Puntilla _00	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
C.Tucume _15	IRR	46	54	47	55	46	46	55	47	55
C.Sasape _14	IRR	46	52	47	52	46	46	52	47	52
C.Morrope _10	IRR	46	54	47	55	45	46	55	47	55
L.Sub Sector Lambayeque _07	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
L.Sub Sector Chiclayo _02	IRR	52	55	53	57	49	52	56	54	58
L.Vista Alegre _02	IRR	52	59	53	61	51	52	60	54	62
E.Sipan _00	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
E.Saltur _00	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
E.Saman _00	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
R.Sub Sector Reque _13	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
R.Sub Sector Monsefu _09	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
R.Sub Sector Eten _04	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
Ch.Pampagrande _03	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
Ch.Chongoyape _03	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
Ch.Majin _03	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
T.Informales1 _05	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
T.Informales3 _15	IRR	46	54	47	54	46	46	54	47	55
Ch.Terrazas _03	IRR	52	56	54	58	52	52	57	54	59
E.Patapo _00	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
U.P.Chiclayo _02	URB	99	99	99	99	99	99	99	99	99
U.P.Lambayeque _07	URB	99	99	99	99	99	99	99	99	99
U.P.Chongoyape _03	URB	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Upstream	IRR	26	28	28	29	26	27	28	28	30

U.P. Mochumi	URB	99	99	99	99	99	99	99	99	99
U.P. Morrope	URB	99	99	99	99	99	99	99	99	99
Ind Pom Tuman Pucala	IND	52	55	53	57	51	52	56	54	58
Ind Alcohol	IND	52	56	54	58	51	52	57	54	59
T. Nueva	IRR	52	62	53	64	49	52	63	54	65
R. Nueva	IRR	52	62	53	64	48	52	63	54	65
C. Nueva	IRR	52	62	53	64	47	52	63	54	65
A Nva Cachinche	IRR	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Chota.Nueva	IRR	26	28	28	30	27	27	29	28	30
Ch01	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
U.P. Upstream	URB	76	77	76	77	76	76	77	76	77
Ch02	IRR	52	55	53	57	51	52	56	54	58
Upstream. Minera	MIN	26	28	28	29	27	27	29	28	30

Cuadro A8.2 Valores de vulnerabilidad por unidades de demanda y para el escenario de riego IRRIG-2035. Los valores del índice de desempeño hacen referencia a una media ponderada de todos los escenarios climáticos analizados y su probabilidad de ocurrencia según las proyecciones del proyecto CMIP5. Tipo = tipo de demanda (DOM = poblacional; IRR = riego; IND = industrial; MIN = minera)

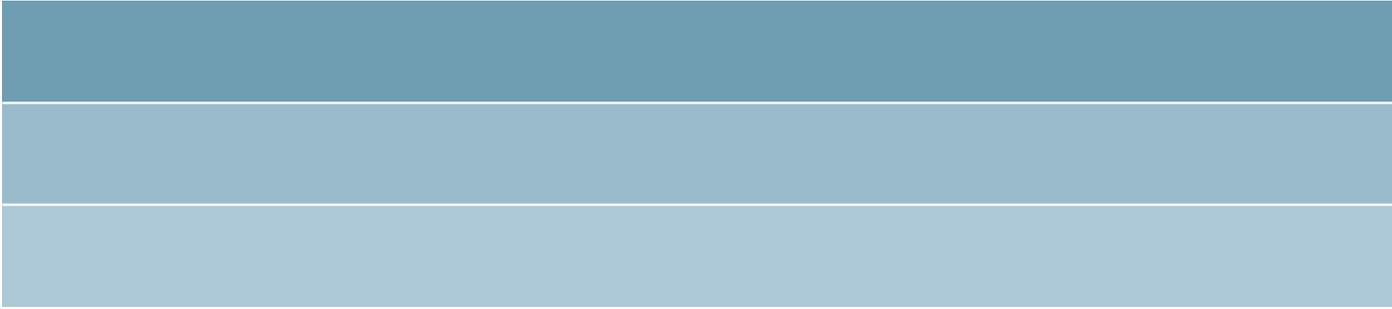
Nodo de demanda (modelo WEAP)	Tipo	BASE	AS	MO	MO-AS	IN	SI	SI-AS	SI-MO	SI-MO-AS
T.Sauce Talamo _12	IRR	0.35	0.30	0.33	0.27	0.35	0.35	0.29	0.32	0.27
T.Balazo _12	IRR	0.35	0.30	0.33	0.27	0.35	0.34	0.29	0.32	0.27
T.Pina _12	IRR	0.35	0.31	0.33	0.28	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28
T.Espino _12	IRR	0.35	0.30	0.33	0.28	0.35	0.35	0.29	0.32	0.27
T.Sencie _12	IRR	0.35	0.31	0.33	0.29	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28
T.Luzfaque _05	IRR	0.33	0.29	0.31	0.27	0.33	0.32	0.28	0.30	0.26
T.Huanabal _05	IRR	0.33	0.29	0.31	0.27	0.33	0.32	0.28	0.30	0.26
T.Informales2 _05	IRR	0.35	0.31	0.33	0.29	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28
T.Tres Tomas _05	IRR	0.33	0.29	0.31	0.27	0.33	0.32	0.28	0.30	0.26
T.Carrizo Chuchicol _05	IRR	0.33	0.29	0.31	0.27	0.33	0.32	0.28	0.30	0.26
T.Fala Falita _05	IRR	0.33	0.29	0.31	0.27	0.33	0.32	0.28	0.30	0.26
T.San Miguel _05	IRR	0.33	0.29	0.31	0.27	0.33	0.32	0.28	0.30	0.26
T.Luya Chucupe _01	IRR	0.35	0.31	0.33	0.29	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28
T.Tuman Jarrin _01	IRR	0.33	0.29	0.31	0.27	0.33	0.32	0.28	0.30	0.26
C.Sub Sector Mochumi _08	IRR	0.34	0.30	0.32	0.28	0.34	0.34	0.29	0.31	0.27
C.Sub Sector Muy Finca _11	IRR	0.35	0.30	0.32	0.28	0.34	0.34	0.29	0.32	0.28
E.Tabernas _00	IRR	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.26
E.Calupe _00	IRR	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.26
L.Santeno _02	IRR	0.35	0.31	0.33	0.29	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28
E.La Puntilla _00	IRR	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.26
C.Tucume _15	IRR	0.39	0.35	0.37	0.34	0.39	0.38	0.35	0.37	0.34
C.Sasape _14	IRR	0.39	0.36	0.38	0.35	0.39	0.39	0.35	0.37	0.34
C.Morrope _10	IRR	0.39	0.35	0.37	0.34	0.39	0.38	0.35	0.37	0.34
L.Sub Sector Lambayeque _07	IRR	0.35	0.31	0.33	0.29	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28
L.Sub Sector Chiclayo _02	IRR	0.35	0.31	0.33	0.29	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28
L.Vista Alegre _02	IRR	0.35	0.29	0.33	0.27	0.35	0.34	0.29	0.32	0.27
E.Sipan _00	IRR	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.26
E.Saltur _00	IRR	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.26
E.Saman _00	IRR	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.26
R.Sub Sector Reque _13	IRR	0.31	0.27	0.30	0.26	0.31	0.31	0.27	0.29	0.26
R.Sub Sector Monsefu _09	IRR	0.31	0.27	0.30	0.26	0.31	0.31	0.27	0.29	0.26
R.Sub Sector Eten _04	IRR	0.31	0.27	0.30	0.25	0.31	0.31	0.26	0.29	0.25
Ch.Pampagrande _03	IRR	0.34	0.30	0.32	0.29	0.34	0.33	0.30	0.31	0.28
Ch.Chongoyape _03	IRR	0.34	0.30	0.32	0.29	0.34	0.34	0.30	0.32	0.28
Ch.Majin _03	IRR	0.34	0.31	0.32	0.29	0.34	0.34	0.30	0.32	0.28
T.Informales1 _05	IRR	0.35	0.31	0.33	0.29	0.35	0.35	0.30	0.32	0.28

T.Informales3_15	IRR	0.38	0.35	0.37	0.33	0.38	0.38	0.34	0.37	0.33
Ch.Terrazas_03	IRR	0.37	0.33	0.35	0.32	0.37	0.36	0.33	0.35	0.31
E.Patapo_00	IRR	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.30	0.26
U.P.Chiclayo_02	URB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U.P.Lambayeque_07	URB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U.P.Chongoyape_03	URB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Upstream	IRR	0.74	0.73	0.74	0.73	0.74	0.74	0.73	0.74	0.73
U.P. Mochumi	URB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U.P. Morrope	URB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ind Pom Tuman Pucala	IND	0.31	0.28	0.30	0.27	0.31	0.31	0.27	0.29	0.26
Ind Alcohol	IND	0.29	0.22	0.28	0.20	0.29	0.29	0.21	0.27	0.20
T. Nueva	IRR	0.35	0.29	0.33	0.27	0.35	0.35	0.28	0.32	0.26
R. Nueva	IRR	0.32	0.20	0.30	0.19	0.32	0.32	0.20	0.30	0.19
C. Nueva	IRR	0.34	0.28	0.32	0.26	0.34	0.34	0.27	0.32	0.25
A Nva Cachinche	IRR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Chota.Nueva	IRR	0.76	0.76	0.76	0.76	0.77	0.76	0.76	0.76	0.76
Ch01	IRR	0.37	0.34	0.35	0.32	0.37	0.37	0.33	0.35	0.32
U.P. Upstream	URB	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12
Ch02	IRR	0.37	0.34	0.35	0.32	0.37	0.37	0.33	0.35	0.32
Upstream. Minera	MIN	0.63	0.62	0.62	0.62	0.63	0.63	0.62	0.62	0.61

Cuadro A8.3 Valores de resiliencia de suministro por unidades de demanda y para el escenario de riego IRRIG-2035. Los valores del índice de desempeño hacen referencia a una media ponderada de todos los escenarios climáticos analizados y su probabilidad de ocurrencia según las proyecciones del proyecto CMIP5. Tipo = tipo de demanda (DOM = poblacional; IRR = riego; IND = industrial; MIN = minera)

Nodo de demanda (modelo WEAP)	Tipo	BASE	AS	MO	MO-AS	IN	SI	SI-AS	SI-MO	SI-MO-AS
T.Sauce Talamo_12	IRR	0.15	0.27	0.14	0.25	0.15	0.14	0.26	0.13	0.26
T.Balazo_12	IRR	0.15	0.27	0.14	0.26	0.15	0.14	0.27	0.13	0.26
T.Pina_12	IRR	0.15	0.21	0.14	0.19	0.15	0.14	0.21	0.13	0.20
T.Espino_12	IRR	0.15	0.26	0.14	0.25	0.15	0.15	0.25	0.13	0.25
T.Sencie_12	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
T.Luzfaque_05	IRR	0.29	0.30	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28
T.Huanabal_05	IRR	0.29	0.30	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28
T.Informales2_05	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
T.Tres Tomas_05	IRR	0.29	0.30	0.28	0.28	0.30	0.29	0.29	0.28	0.28
T.Carrizo Chuchicol_05	IRR	0.29	0.30	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28
T.Fala Falita_05	IRR	0.29	0.30	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28
T.San Miguel_05	IRR	0.29	0.30	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28
T.Luya Chucupe_01	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
T.Tuman Jarrin_01	IRR	0.29	0.30	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28
C.Sub Sector Mochumi_08	IRR	0.15	0.27	0.14	0.25	0.15	0.14	0.26	0.13	0.26
C.Sub Sector Muy Finca_11	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.14	0.17	0.13	0.16
E.Tabernas_00	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
E.Calupe_00	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
L.Santeno_02	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
E.La Puntilla_00	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
C.Tucume_15	IRR	0.14	0.24	0.14	0.24	0.14	0.14	0.24	0.14	0.25
C.Sasape_14	IRR	0.14	0.21	0.14	0.21	0.14	0.14	0.21	0.14	0.22
C.Morrope_10	IRR	0.14	0.24	0.14	0.24	0.14	0.14	0.24	0.14	0.25
L.Sub Sector Lambayeque_07	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
L.Sub Sector Chiclayo_02	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
L.Vista Alegre_02	IRR	0.15	0.25	0.14	0.23	0.15	0.15	0.24	0.13	0.24
E.Sipan_00	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
E.Saltur_00	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
E.Saman_00	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16

R.Sub Sector Reque _13	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
R.Sub Sector Monsefu _ 09	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
R.Sub Sector Eten _ 04	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
Ch.Pampagrande _ 03	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
Ch.Chongoyape _ 03	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
Ch.Majin _ 03	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
T.Informales1 _ 05	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
T.Informales3 _ 15	IRR	0.14	0.24	0.14	0.24	0.14	0.14	0.24	0.14	0.25
Ch.Terrazas _ 03	IRR	0.15	0.18	0.15	0.16	0.16	0.15	0.17	0.14	0.17
E.Patapo _ 00	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
U.P.Chiclayo _ 02	URB	0.52	0.50	0.53	0.52	0.52	0.43	0.44	0.52	0.52
U.P.Lambayeque _ 07	URB	0.53	0.50	0.54	0.53	0.54	0.51	0.50	0.54	0.56
U.P.Chongoyape _ 03	URB	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Upstream	IRR	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12
U.P. Mochumi	URB	0.53	0.50	0.54	0.53	0.54	0.51	0.50	0.54	0.56
U.P. Morrope	URB	0.53	0.50	0.54	0.53	0.54	0.51	0.50	0.54	0.56
Ind Pom Tuman Pucala	IND	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
Ind Alcohol	IND	0.15	0.20	0.14	0.18	0.15	0.15	0.19	0.13	0.18
T. Nueva	IRR	0.15	0.28	0.14	0.27	0.16	0.14	0.28	0.13	0.28
R. Nueva	IRR	0.15	0.28	0.14	0.27	0.15	0.15	0.28	0.13	0.28
C. Nueva	IRR	0.15	0.28	0.14	0.27	0.16	0.14	0.28	0.13	0.28
A Nva Cachinche	IRR	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Chota.Nueva	IRR	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12
Ch01	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
U.P. Upstream	URB	0.32	0.30	0.32	0.31	0.32	0.32	0.31	0.32	0.32
Ch02	IRR	0.15	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15	0.17	0.13	0.16
Upstream. Minera	MIN	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12



Deltares