



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
del Perú - SENAMHI



DIRECCIÓN GENERAL DE HIDROLOGÍA

INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO RÍMAC

ESTUDIO



Lima, Noviembre 2014



Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

PERSONAL DIRECTIVO

Ing. Oscar G. Felipe Ovando

***Director de Hidrología y Recursos Hídricos del
SENAMHI***

PhD. Waldo Lavado Casimiro

Director de Hidrología Aplicada del SENAMHI

REVISOR DEL ESTUDIO

PhD. Waldo Lavado Casimiro

Director de Hidrología Aplicada del SENAMHI

RESPONSABLE DEL ESTUDIO

Ing. Fiorella Vega Jácome

Especialista en Hidrología del SENAMHI

Lima-Perú

Noviembre 2014

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	3
I. ASPECTOS GENERALES.....	4
INTRODUCCIÓN.....	4
ANTECEDENTES.....	5
JUSTIFICACIÓN	5
OBJETIVOS.....	6
II. ZONA DE ESTUDIO	6
2.1. UBICACIÓN.....	7
2.2. ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS	9
2.2.1 Población	9
2.2.2 Actividades Económicas.....	9
2.3. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES	11
2.4. CLIMATOLOGÍA DE LA CUENCA	14
2.5. HIDROMETRÍA DE LA CUENCA	19
III. MÉTODOS	22
3.1. ESTIMACIÓN DE ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN	22
3.1.1 Interpolación	22
3.1.2 Anomalías de precipitación.....	23
3.2. ESTIMACIÓN DEL ECOFLUJO	23
3.2.1 Análisis de la información disponible	23
3.2.2 Definición del periodo natural.....	24
3.2.3 Ecoflujo Anual o Estacional	25
3.3. ESTIMACIÓN DE LOS IAH.....	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
4.1. ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN	30
4.2. ECOFLUJO.....	31
4.2.1 Análisis de Ecoflujo Anual	31
4.1.2 Análisis de Ecoflujo Estacional.....	33
4.3. INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA-IAH.....	39
4.4. IMPLICANCIAS DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE CAUDALES EN EL RÍO RÍMAC	41
V. CONCLUSIONES	43
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXO	45

RESUMEN

El presente estudio tiene como principal objetivo el análisis de las variaciones en el régimen de los caudales del Río Rímac utilizando la metodología de Indicadores de Alteración Hidrológica y el Ecoflujo, a la altura de la estación hidrométrica Chosica R-2; el análisis se realizó teniendo en cuenta un periodo natural (1920-1960) y un periodo alterado (1961-2012). Para el estudio se utilizó información meteorológica mensual de 26 estaciones e información hidrológica diaria de la estación "Chosica R-2", con un registro de 93 años.

Los resultados mostraron la variación en la estacionalidad de los caudales del periodo alterado con respecto al periodo natural, con tendencia al incremento de los caudales mínimos y reducción de los caudales máximos. A nivel inter-anual se identificó una reducción de los caudales (Ecodéficit) en temporada lluviosa, fuertemente relacionado con anomalías negativas de precipitación e incremento de los caudales (Ecosuperávit) en temporada seca, dissociada de las variaciones en la precipitación, lo cual sería producto de la influencia de la regulación y trasvase. Además, se evidenció un 36% de incremento de los caudales bajos, con menor duración y frecuencia, y un 26% de reducción de los caudales altos, con mayor frecuencia pero menor duración.

Concluyendo que los métodos de Ecoflujo y los IAH son complementarios y eficientes para caracterizar, cuantificar y explicar los cambios en el régimen de caudales del Río Rímac; sin embargo, se necesitan más investigaciones para poder determinar las implicancias en el ecosistema del río.

ABSTRACT

This study has as principal objective the analysis of the flow regimen variations of the Rimac river using Indicators of Hydrologic Alteration and Ecoflow methodologies, at the hydrometric station Chosica R-2; the analysis was performed considering a natural period (1920-1960) and an altered period (1961-2012). For the study it was used monthly weather information from 26 stations and daily hydrological information from "Chosica R-2" station, with a record of 93 years.

The results showed the variation in the seasonality of flows in altered period with respect to natural period, with a tendency to increased minimum flows and reduced peak flows. To inter-annual level was identified a reduction of flows (Ecodéficit) in rainy season, strongly related to negative anomalies of precipitation and increased of flows (Ecosuperávit) in dry season, dissociated from changes in precipitation, which would be caused by the influence of regulation and transfer. In addition, was evidenced a 36% increase in low flows, with less duration and frequency, and a 26% reduction in high flows, with more frequency but shorter duration.

Concluding that Ecoflujo methods and IAH are complementary and efficient to characterize, quantify and explain the changes in the flow regime of the river Rimac; nevertheless, it is needed more research to determine implications in the river ecosystem.

I. ASPECTOS GENERALES

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua dulce, para los usos prioritarios como son el consumo humano y la agricultura, es una de las mayores preocupaciones en relación a las consecuencias del cambio climático. El incremento de la temperatura global podría acelerar el ciclo hidrológico, dando lugar a un cambio en la distribución espacial y temporal de los recursos hídricos (Labat et al. 2004).

En todo el mundo, la construcción de represas y otras infraestructuras y la extracción de agua para su uso en agricultura, industrias y consumo doméstico, han modificado el régimen de los caudales, cambiado el transporte de sedimentos y nutrientes, modificado los hábitat y perturbado rutas de migración de la biota acuática (World Resources Institute 2005). La fuente predominante de alteraciones de caudales por causas antropogénicas fueron los embalses, seguidos de la captación de agua, cambios de uso de suelos y el clima (Ashton, 2012).

La cuenca del Río Rímac, ubicada en la costa central del Perú, es la fuente de agua que cubre la demanda para los diferentes usos en la capital del país, Lima, la cual alberga una población de 8,751,741 habitantes (al año 2014), que representa alrededor del 30% de la población total del Perú, emplazada en un área del 2.7% del territorio nacional (INEI, 2014). Lima es la segunda ciudad más grande del mundo ubicada en un desierto, después del Cairo (WWF Perú, 2014).

Además, en base a las cifras del reporte de (WWF Perú, 2014), se sabe que, de la producción total de agua de la cuenca alta del Río Rímac, un 80% es utilizado para cubrir la demanda para uso poblacional, cantidad que a su vez cubre el 63% de la demanda de agua potable de la Provincia de Lima. Por lo que es de vital importancia conocer la evolución temporal de las variaciones en el régimen de los caudales del Río Rímac.

La intensificación de actividades humanas, incluyendo el cambio de uso del suelo, construcción de embalses y trasvases, han generado cambios en los caudales, alterando los regímenes naturales de caudal, principalmente en los ríos aledaños a las principales ciudades del país. Para evaluar el impacto de los cambios en el régimen de flujo y para el manejo de ríos, se necesitan evaluar indicadores para entender el estado de salud ecológica del río y el grado de alteración hidrológica.

En este sentido, el método de Indicadores de Alteración Hidrológica, es el más comúnmente usado para cuantificar las alteraciones de un régimen de caudales (Richter, Baumgartner, Powell, & Braun, 1996) y el método de Ecoflujo introducido por (Vogel et al., 2007), con medición adimensional de Ecodéficit y Ecosuperávit, basados en curvas de duración, aparece como un método alternativo y más sencillo para evaluar dichos cambios.

Las implicancias de las alteraciones del régimen de los caudales en el ecosistema, son motivo de estudio de biólogos y especialidades afines, con la limitante de la complejidad de cada ecosistema y las posibles variaciones en la respuesta de la biodiversidad que albergan, a los cambios en el caudal. Los impactos del cambio en los caudales se manifiesta en todos los grupos taxonómicos incluyendo plantas rivereñas, invertebrados y peces. (BUNN & ARTHINGTON, 2002)

En el presente estudio se analizan las variaciones en los caudales para la cuenca alta del Río Rímac, con el objetivo de caracterizar, cuantificar y explicar las alteraciones del régimen natural de los caudales del Río Rímac luego de la implementación de los proyectos de regulación y trasvase en

la cuenca, considerando además una evaluación de los posibles impactos en el ecosistema del Río Rímac, producto de las alteraciones más significativas en el régimen de sus caudales.

ANTECEDENTES

Las numerosas investigaciones en relación a las alteraciones hidrológicas en el régimen de los caudales de los ríos, como consecuencia de las actividades humanas, desarrolladas en diferentes países como Estados Unidos, Korea del Sur, China, España, entre otros, revela el creciente interés en el tema con fines de gestión de los recursos hídricos y conservación ambiental; temática que se ha difundido desde su inicio a finales de los años 90, con más énfasis en los últimos años.

A nivel nacional, se han encontrado en la bibliografía estudios orientados a la estimación de caudales ecológicos, más no estudios relacionados a la estimación de las alteraciones en el régimen de los caudales en los cursos de agua.

JUSTIFICACIÓN

Por su ubicación geográfica y política, la cuenca del río Rímac es de mucha importancia ya que en su ámbito se encuentra la ciudad de Lima, por ser una ciudad de alta densidad urbana y poblacional, que genera condiciones totalmente distintas y singulares.

El Río Rímac desempeña un rol vital como fuente de abastecimiento de agua para el consumo humano, agrícola y energético. Contiene cinco centrales hidroeléctricas importantes y sostiene un amplio rango de actividad minera que es particularmente intensa en las zonas más altas.

El SENAMHI tiene como parte de sus objetivos lograr la evaluación cuantitativa y cualitativa de los recursos hídricos y determinar su potencial económicamente utilizable para diferentes usos sectoriales, además de orientar y fomentar la investigación científica y tecnológica en las diferentes áreas de la meteorología, hidrología, agrometeorología y otras, para su aplicación en el desarrollo nacional.

La Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos (DGH) es el órgano de línea encargado de realizar estudios, investigaciones, proyectos y servicios en el área de la hidrología y recursos hídricos y sus aplicaciones en el país. Teniendo como una de sus funciones la de ejecutar la vigilancia y evaluación del recurso hídrico superficial, a fin de contribuir a la preservación y conservación del medio ambiente y al desarrollo de las actividades humanas.

El SENAMHI, a través de la DGH viene monitoreando los caudales de la cuenca del Río Rímac con estaciones hidrométricas desde los años 60's, habiéndose mejorado la instrumentación para la medición en los últimos años, por lo que a la actualidad se cuenta con información de niveles y caudales del Río Rímac, además de información pluviométrica en la estación de Chosica R-2.

En el Perú, diversas entidades han realizado estudios hidrológicos orientados a conocer la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del Río Rímac, considerando la regulación de las lagunas en la cuenca alta y el trasvase de agua de cuencas vecinas, complementariamente, el SENAMHI realiza el monitoreo permanente de las condiciones hidrológicas del Río Rímac y el respectivo pronóstico para las siguientes 72 horas; sin embargo, hasta el momento no se encontró en

la bibliografía ningún estudio orientado al análisis de las posibles Alteraciones Hidrológicas causada por la regulación de las cuencas en nuestro país.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y cuantificar las variaciones en el régimen de los caudales de la cuenca alta del Río Rímac y evaluar su relación con la precipitación en la cuenca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las alteraciones en el régimen de los caudales del Río Rímac mediante el método de Ecoflujo y evaluar su relación con las anomalías de precipitación.
- Cuantificar las alteraciones en el régimen de los caudales del Río Rímac mediante el método de Indicadores de Alteración Hidrológica.
- Comparación de los resultados del método de Ecoflujo y del método de Indicadores de Alteración Hidrológica.
- Evaluar las posibles implicancias de las alteraciones en el régimen de los caudales encontradas en el Río Rímac.

II. ZONA DE ESTUDIO

La zona de interés del presente estudio está delimitada por la cuenca alta del Río Rímac, ubicada en la vertiente del Pacífico, en la zona central del territorio peruano que comprende las regiones de costa y sierra. La cuenca del Río Rímac es la fuente de agua para uso doméstico, agrícola y energético para la capital del Perú, Lima, la cual sustenta la tercera parte de la población del país y es la segunda ciudad más grande del mundo ubicada en un desierto, después del Cairo (WWF Perú, 2014).

La cuenca alta del Río Rímac es regulada y cuenta con un área de drenaje de aproximadamente 2 303 Km² hasta la estación de Chosica R-2. El Río Rímac es formado por la unión de los ríos Santa Eulalia y San Mateo; el primero de ellos nace de la laguna Pacocochoa sobre los 4 380 msnm en la localidad de Huanza, el segundo nace de los deshielos del nevado Uco, quebrada Antaccasa, a 5 100 msnm aproximadamente. Los ríos Santa Eulalia y San Mateo reciben los aportes de agua de sus quebradas tributarias, hasta la localidad de Ricardo Palma, donde se unen tomando el nombre del Río Rímac, el cual atraviesa la ciudad de Lima, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

La zona de estudio, aguas arriba de la estación Chosica R-2, ha sido intervenida desde aproximadamente los años 60's, desde la construcción del Túnel Grathon hasta la implementación de los proyectos Marca I a Marca III, estos últimos se resumen en el Cuadro 2.1 y tienen como principal objetivo el de cubrir la creciente demanda de agua de la ciudad de Lima.

2.1. UBICACIÓN

Ubicación Geográfica

La cuenca del río Rímac se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas 11°36'52" y 12°05'47" de latitud Sur y entre 76°11'05" y 77°04'36" de longitud Oeste. (Figura 2.1).

Ubicación Hidrográfica

La cuenca del río Rímac pertenece hidrográficamente a la vertiente del Pacífico; el río Rímac nace en la Cordillera Central de los Andes y recorre perpendicularmente hasta desembocar en el Océano Pacífico (Figura 2.1).

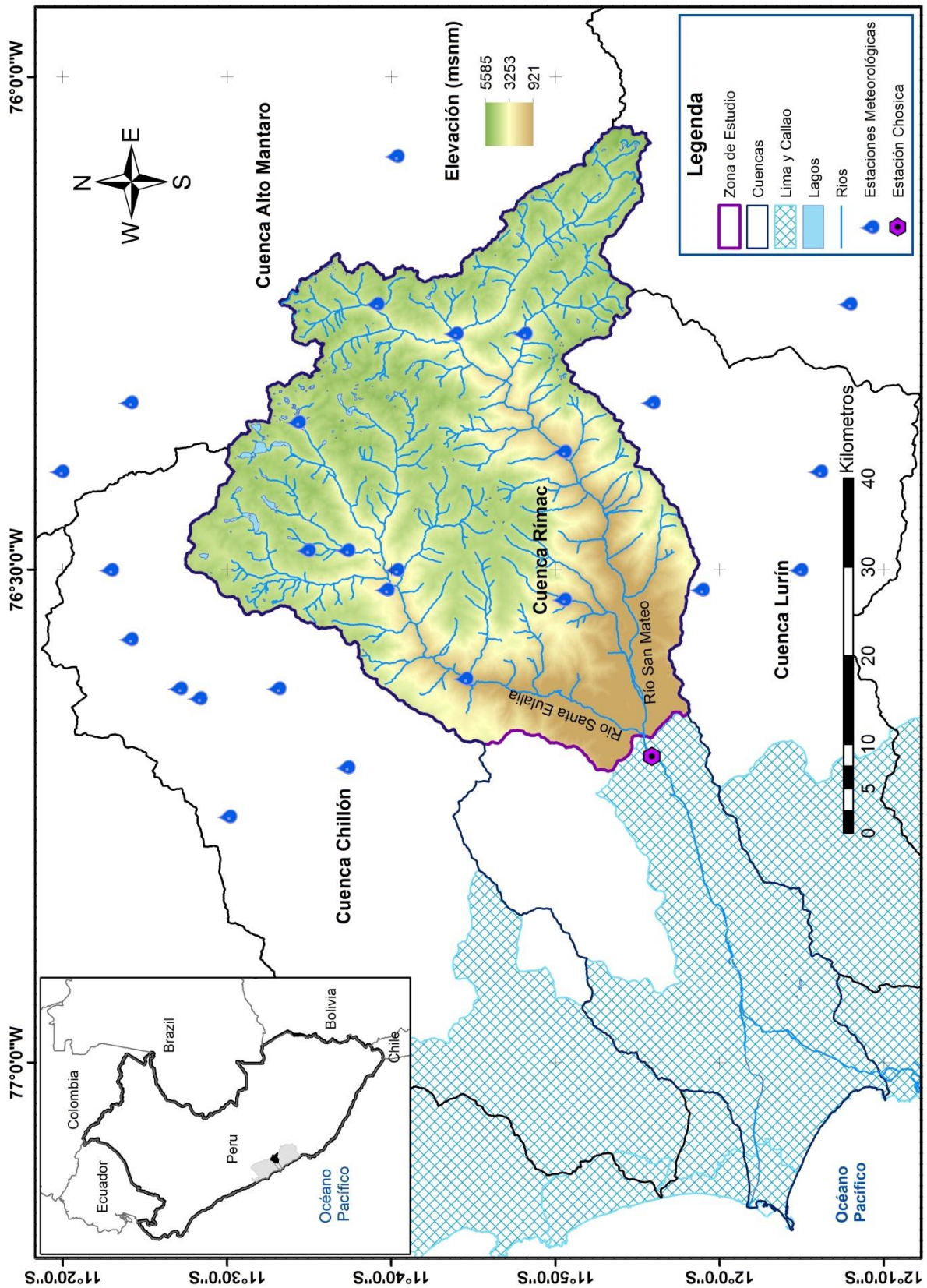
La cuenca del río Rímac limita al Norte con la cuenca del río Chillón, al Sur con la cuenca de los ríos Mala y Lurín, por el Este con la cuenca del río Mantaro y por el Oeste con el Océano Pacífico.

El escurrimiento natural del río se origina como consecuencia de las precipitaciones estacionales que ocurren en la alta cuenca. En época de estiaje, el río Rímac disminuye su caudal, de acuerdo a los registros de la estación Chosica R-2.

Ubicación Política

Políticamente la cuenca del río Rímac se encuentra ubicada en su mayor extensión en el departamento de Lima y una pequeña parte en el departamento de Junín; enmarcándose en la provincia de Lima, Huarochirí y Yauli respectivamente.

Figura 2.1: Mapa de la zona de estudio. Ubicación de estaciones meteorológicas y estación hidrométrica Chosica R-2



2.2. ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

2.2.1 Población

En base a las cifras del reporte de (WWF Perú, 2014), se sabe que, de la producción total de agua de la cuenca alta del Río Rímac, un 80% es utilizado para cubrir la demanda para uso poblacional, cantidad que a su vez cubre el 63% de la demanda de agua potable de la Provincia de Lima.

La cuenca del Río Rímac, ubicada en la costa central del Perú, es la principal fuente de agua que cubre la demanda para los diferentes usos en la capital del país, Lima, la cual alberga una población de 8,751,741 habitantes (al año 2014), que representa alrededor del 30% de la población total del Perú.

La cuenca media y alta del río Rímac presenta poblados con poblaciones por debajo de los 7,000 habitantes. A lo largo del río Rímac, los distritos más importantes son Chicla (7,194 habitantes), Matucana (4,508 habitantes), San Mateo (5,280 habitantes), Ricardo Palma (5,769 habitantes), Santa Cruz de Cocachacra (2,302 habitantes), Surco (1,798 habitantes) y San Bartolomé (1,793 habitantes).

2.2.2 Actividades Económicas

Agricultura

La agricultura en la cuenca alta del río Rímac es de subsistencia y en pequeñas áreas, a diferencia de la agricultura que se practica en el valle, aguas debajo de la estación Chosica R-2, la cual se practica de manera extensiva.

La agricultura constituye la principal actividad socio-económica del valle y la cuenca del río Rímac, con un consumo de agua superficial de 105'150,000 m³ (Administración Local del Agua Chillón Rímac Lurín).

En la cuenca Rímac existen 133 manantiales con caudales menores a 1.0 l/s, ubicados en mayor cantidad en la cuenca del río Santa Eulalia, cuyas aguas son utilizadas en la agricultura.

Minería

El centro de trabajo más importante del distrito de Chicla es el consorcio minero Casapalca-Yauliyacu, al que pertenecen las minas y la planta concentradora de Casapalca. En esta zona hay presencia de gran cantidad de relaves, que se han acumulado a través de décadas, debido a la explotación de productos metálicos como Cobre, Plomo, Zinc y Plata.

En San Mateo, la minería es la segunda actividad de mayor participación en la PEA después de la agricultura. Las minas en actividad de este distrito son San Marino y Tamboraque, pertenecientes a las empresas Compañía Minera Lizandro Proaño S. A. y Compañía Minera El Barón S.A., respectivamente.

Las minas: Elenita, Milagro y Graciela se encuentran en el distrito de Santa Cruz de Cocachacra, las dos primeras pertenecen a la empresa minera Cecibar S.A., mientras que la tercera pertenece a Perubar S.A. En este distrito cerca del 8.79% de la PEA se dedica a la actividad minera.

Industria

En tanto las actividades artesanales mantienen un bajo grado de desarrollo, particularmente en las áreas rural y urbano – marginal. La micro y la pequeña empresa, constituyen más del 50% de las unidades productivas, de la Región.

Hidroeléctrica

La cuenca del Río Rímac es una de las cuencas más explotadas de la costa peruana, en ella se tienen actualmente funcionando 6 centrales hidroeléctricas, de las cuales, 4 se encuentran en la cuenca alta:

a. C.H Callahuanca

Ubicada a 52 km al este de Lima, a 1395 msnm, en la provincia de Huarochirí, lleva el nombre del distrito al cual pertenece; opera desde el año 1938 y se abastece de las aguas turbinadas provenientes de las centrales hidroeléctricas Huinco y Matucana. La central, tiene un caudal de diseño de 12.5 m³/s.

b. C.H. Huinco

Ubicada en la Subcuenca del Río Santa Eulalia en el kilómetro 25 Carretera Central; viene operando desde el año 1964. La central usa las aguas provenientes del embalse Sheque que tiene una capacidad de almacenamiento de 430,000 m³ el cual es abastecido por el mega-proyecto Marcapomacocha.

c. C.H. Matucana

Ubicada en la provincia de Huarochirí, distrito San Jerónimo de Surco, viene operando desde el año 1972; utiliza las aguas del Río Rímac valiéndose de las aguas del embalse Yuracmayo, mediante la captación Tamboraque. Las aguas captadas son derivadas mediante un túnel a la cámara de carga con una capacidad de 60,000 m³; tiene un caudal de diseño de 16 m³/s.

d. C.H. Huanchor

Ubicada en la provincia de Huarochirí, distrito de Matucana; la central aprovecha las aguas del Río Rímac, las aguas son captadas directamente mediante una bocatoma de aproximadamente 2 kilómetros hacia la cámara de carga de 5,000 m³, tiene un caudal de diseño de 10 m³/s.

2.3. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES**Ríos, Manantiales y Lagunas**

En la cuenca del río Rímac, se tiene 11 ríos, los cuales confluyen en las dos subcuencas principales para formar el Río Rímac.

En la cuenca Rímac existen 133 manantiales y se ubican en mayor cantidad en la cuenca del río Santa Eulalia, siendo utilizados en agricultura con caudales menores a 1.0 l/s y la mayoría de ellos no tienen toma de captación.

Existen 145 lagunas naturales y según capacidad de almacenamiento, 125 (71.4%) tienen volumen actual menores a 0.25 hm³ y 136 (77.7%) no tienen caudal de salida.

Humedales (bofedales)

Los bofedales se forman en zonas como las del macizo andino ubicadas sobre los 3.800 metros de altura, en donde las planicies almacenan aguas provenientes de precipitaciones pluviales, deshielo de glaciares y principalmente afloramientos superficiales de aguas subterráneas.

Actualmente no existe un inventario de los bofedales presentes en la cuenca del Rímac pero se sabe de su existencia.

Estructuras de Regulación

En los años sesenta se construyó uno de los primeros proyectos que permitió regular el río Rímac, el túnel Grathon, el cual empezó a operar en el año 1962 (ANA, 2010), este túnel está ubicado en el distrito de San Mateo (cuenca alta), provincia de Huarochirí a una altura 3210 m.s.n.m; el túnel, que en realidad está constituido por dos túneles (uno de drenaje y otro de mantenimiento), tiene la finalidad de drenar las aguas que se pierden por filtración en las galerías de las mineras (principalmente de la mina Casapalca) presentes en la zona. Los túneles de una longitud de 11.7 kilómetros inician cerca de la quebrada Carmen, tienen una capacidad máxima de 10.30 m³/s y descargan un promedio 4.75 m³/s (SEDAPAL) en épocas de estiaje (junio-noviembre).

Actualmente, las fuentes de agua en la cuenca del Río Rímac son mayoritariamente fuentes artificiales; como cuerpos de agua artificiales destacan 15 lagunas represadas en la

parte alta de la sub-cuenca del río Santa Eulalia, con un volumen total de 77 MMC (algunas de estas estructuras de represamiento se construyeron a fines del siglo IXX y comienzos del siglo XX), y la represa Yuracmayo en la sub-cuenca de San Mateo en el río Blanco con una capacidad de 48 MMC, ambos recursos de la cuenca del río Rímac; además, se tienen los trasvases y regulaciones del sistema Marcapomacocha con 157.05 MMC ubicados en la cuenca del Río Mantaro (Proyectos Marca I y Marca III), cuyo recurso hídrico es aportante de la cuenca del río Rímac.

Cuadro 2.1: Proyectos en la Cuenca del Río Rímac

PROYECTO	FUENTES APORTANTES	Q(m ³ /s)	PUESTA EN OPERACIÓN	DETALLES
Marca I (Marcapomacocha Milloc)	Lagunas: Marcapomacocha, Antacoto, Marcacocha, Pucrococha, Tucto y Milloc.	6.0	Obras concluidas en 1966	El principal objetivo fue cubrir la demanda del servicio eléctrico en la ciudad de Lima.
Marca II (Derivación Pomacocha - Río Blanco)	Lagunas: Pomacocha y Huallacocha. Quebrada Pucullo.	4.0	Pendiente, aun no construido	La finalidad del proyecto es cubrir la creciente demanda de agua en la ciudad de Lima
Marca III (Afianzamiento del sistema Marcapomacocha)	Quebradas Cusurcocha y Casacanchan	3.0	Obras terminadas en 1999	La finalidad del proyecto fue afianzar el caudal de Marca I
Marca IV (Huascarcocha -Rímac)	Lagunas: Huascarcocha, Sheque, Huaroncocha, Quimacocha, Naticocha, Yanamachay.	2.4	Obras terminadas en 2012	La finalidad del proyecto fue aumentar el caudal de trasvase (Marcal-III) para cubrir la demanda de agua de la ciudad de Lima
Marca V (Embalse Casacancha)	Río Carispaccha	1.8	Destinado para el 2030	La finalidad del proyecto es aportar en épocas de estiaje a la cuenca del Rímac, en las plantas de la Atarjea y Huachipa

Fuente: Elaboración propia

Glaciares

Los glaciares han provisto continuamente de agua para sostener las descargas de los ríos durante las sequías y la temporada seca, los ríos y riachuelos alimentados por glaciares tendrán menores caudales en temporada seca y una mayor variabilidad con una masa glaciar reducida aguas arriba. Los efectos y consecuencias podrían ser diferentes en la etapa inicial y

final del retroceso glaciar y dependiendo de la ubicación (Francou and Coudrain 2005; Juen et al. 2007).

En la cordillera La Viuda, con una superficie glaciar de 6,03 km² (inventario al año 2007), se ha determinado 65 glaciares, caracterizados como pequeños por ser menores o iguales a 1 km², sobre los 4900 msnm; de los cuales, 12 se encuentran dentro de la cuenca del Río Rímac.

En relación a la evolución de la superficie glaciar de la cordillera La Viuda, determinaron una pérdida de área glaciar de 22,57 km² que representa el 78,92% de 28,60 km² según la cobertura glaciar de la década de 1970.

La cuenca del Rímac alberga el 10.95% (0.66 Km²) de la superficie Glaciar de la cordillera La Viuda, de los cuales, el 80% (0.53 Km²) están localizadas en la subcuenca Santa Eulalia. (ANA, 2012)

Una simulación de la evolución del área del glaciar del sistema Rímac-Mantaro mostró una marcada reducción de los glaciares en un periodo de 30 a 40 años. En 1970, el área de glaciares observada en las cuencas del Rímac y el Mantaro era de 113 km², disminuyendo a casi 40 km² en 1997; la tasa de retroceso glaciar se incrementó en las décadas de los 70s y 80s (Apaestequi et al., 2009)

A pesar de la presencia de glaciares en parte alta de la cuenca del Río Rímac, la contribución de agua al río Rímac, producto de la deglaciación, no parece haber sido significativa y actualmente mucho menos.

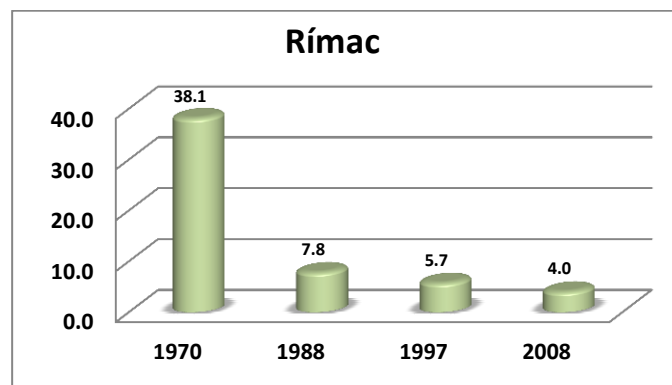


Figura 2.2: Cuantificación del Retroceso Glaciar (Km²) en la Cuenca del Rímac
Fuente: Suarez, W., Condom, T. & Apastegui, J. (2010)

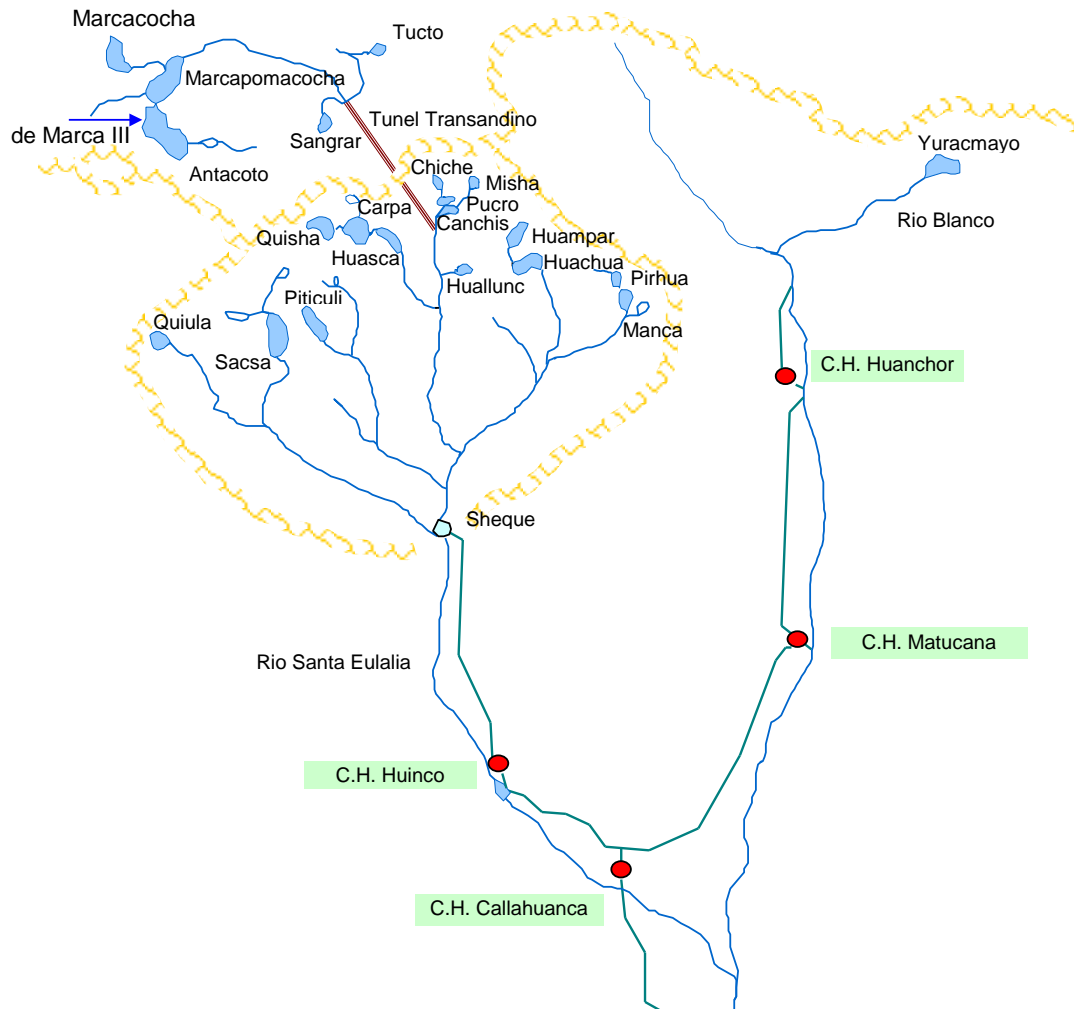


Figura 2.3: Sistema Hidrológico de la Cuenca del Río Rímac.
Fuente: EDEGEL, 2008

2.4. CLIMATOLOGÍA DE LA CUENCA

La zona de estudio se caracteriza por presentar un clima muy húmedo y frígido; es decir, con precipitaciones cuyo promedio anual está alrededor de 647.6 mm, con precipitaciones en el período diciembre-marzo.

Los principales parámetros climáticos que definen o caracterizan el clima de la cuenca del río Rímac son:

Precipitación

La precipitación representa la entrada natural del agua dentro de las cuencas hidrográficas, la cual puede darse en estado sólido o líquido en la cuenca del Río Rímac.

Las precipitaciones en la cuenca del Río Rímac poseen una alta variabilidad determinada entre otras causas por la diferencia altitudinal entre la parte alta y baja de la

cuenca, con precipitaciones casi nulas, en la parte baja de la cuenca, a precipitaciones que superan los 200 mm mensuales, en la parte alta de la cuenca.

En la [Figura 2.4](#), se puede apreciar el mapa climático de precipitación de la cuenca de estudio, en el cual es posible distinguir la relación de los valores de precipitación con el gradiente altitudinal de la cuenca; con precipitaciones menores a 68 mm en promedio en la parte baja de la zona de estudio y valores superiores a 848 mm en la parte alta de la misma.

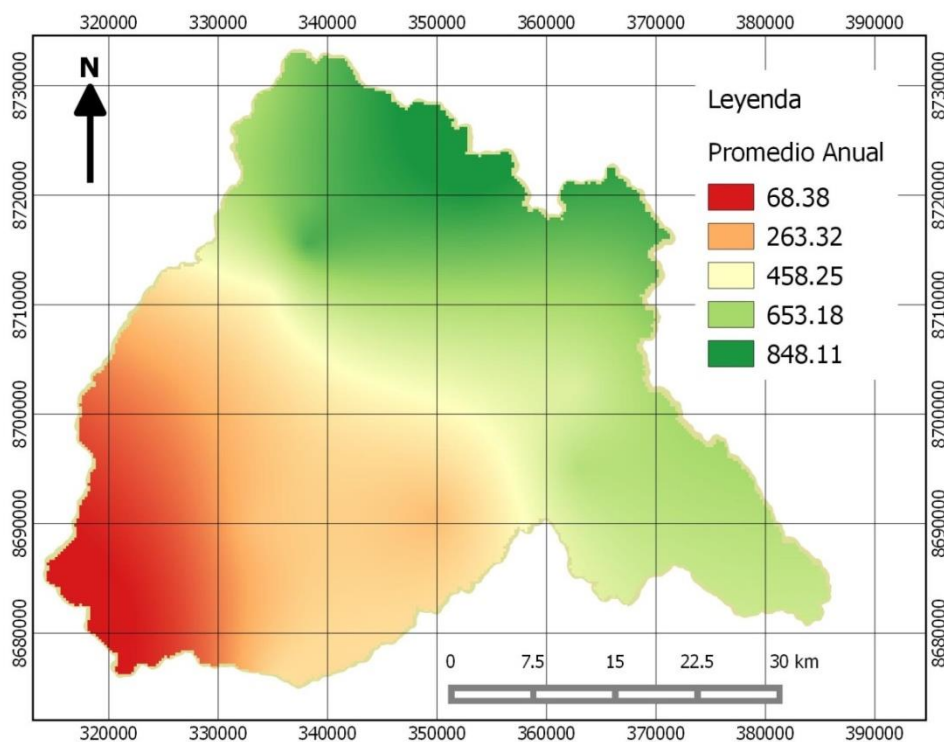


Figura 2.4: Precipitación promedio multianual de la Cuenca de Estudio

La información pluviométrica para el presente estudio, a paso de tiempo mensual, para el periodo de 1964 al 2013, proviene de los registros de 26 estaciones pluviométricas, de las cuales 11 estaciones están localizadas dentro de la cuenca de estudio y las restantes pertenecen a las cuencas colindantes: Mantaro, Chillón, Lurín y Mala ([Tabla 2.1](#), [Figura 2.7](#)).

Asimismo, las estaciones utilizadas en el estudio, evidencian que la precipitación promedio anual está positivamente correlacionada con la altitud de la estación, como se observa en la [Figura 2.5](#), en la que se ordenaron las estaciones en función a su altitud.

Tabla 2.1: Estaciones Pluviométricas

Estación	Coordenadas			Pprom
	Latitud	Longitud	Elev. (msnm)	
Arahuay	-11.6169	-76.7003	2800	25.4
Canchacalla	-11.8448	-76.5314	2554	23.6
Rio Blanco	-11.7345	-76.2589	3550	43.5
Sheque	-11.6666	-76.4987	3214	36.7
Langa	-12.1000	-76.4000	2860	22.5
Tingo	-11.6167	-76.4833	4200	73.4
Pariacancha	-11.3833	-76.5000	3800	58.4
Mina Colqui	-11.5833	-76.4833	4600	57
Chalilla	-11.9333	-76.3333	4050	28.4
Yantac	-11.3333	-76.4000	4600	67
Autisha	-11.7352	-76.6065	2171	19.1
Huamantanga	-11.5000	-76.7500	3392	29.3
Lachaqui	-11.5503	-76.6169	3668	48.7
Huaros	-11.4000	-76.5667	3585	38.9
Carampoma	-11.6550	-76.5153	3489	33.2
Santiago de Tuna	-11.9833	-76.5167	2921	26.2
San José de Parac	-11.8005	-76.2581	3866	51.7
Yauli	-11.6667	-76.0833	4141	79.1
Casapalca	-11.6478	-76.2334	4214	56.7
Milloc	-11.5700	-76.3500	4398	76.4
Antioquia	-12.0833	-76.5000	1839	6.7
Obrajillo	-11.4526	-76.6221	2468	32.2
Canta	-11.4711	-76.6258	2832	33.2
Matucana	-11.8391	-76.3780	2479	23.7
Marcapomacocha	-11.4044	-76.3250	4479	94.1
Huaro-chiri	-12.1333	-76.2333	3154	36.4

La fuente de información de las estaciones de la tabla fue el SENAMHI. Pprom es la precipitación promedio mensual de la estación.

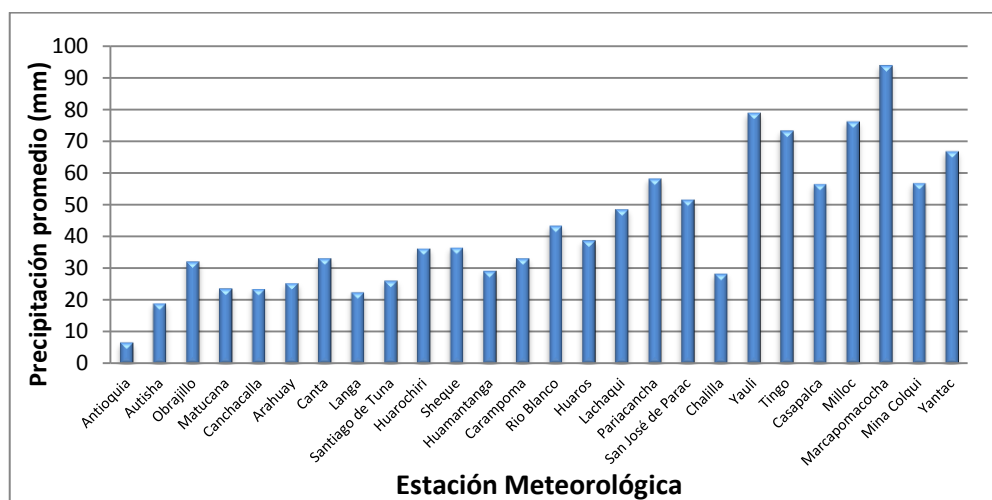


Figura 2.5: Precipitación promedio anual de las estaciones de estudio

En relación a la estacionalidad de la precipitación en la zona de estudio, dicho comportamiento estacional es similar en toda la cuenca, con mayores precipitaciones en los meses de noviembre a abril; sin embargo, la parte alta de la zona de estudio presenta mayor cantidad de precipitación, como se puede observar en la estación Milloc de la Figura 2.6, mientras que la parte baja de la zona de estudio presenta valores de precipitación tres veces menor a los de la cuenca alta, con precipitaciones prácticamente nulas en los meses de mayo a octubre.

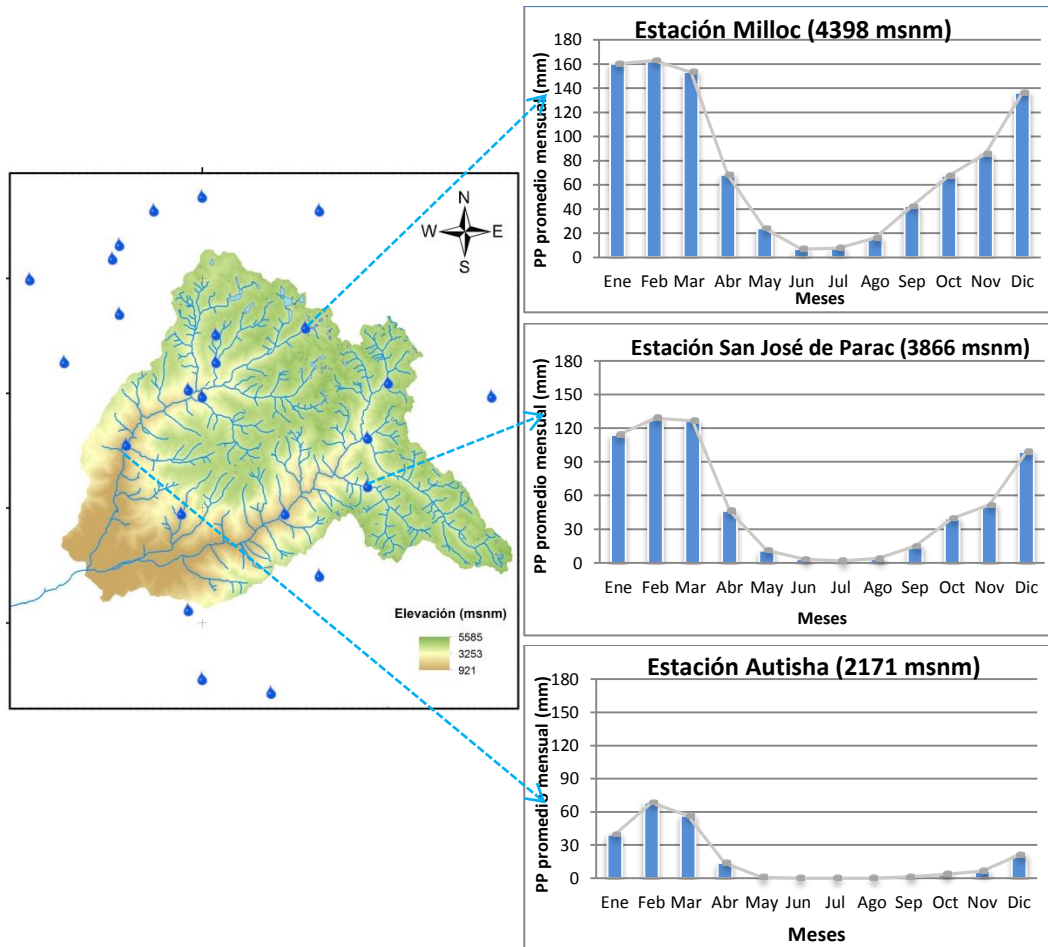


Figura 2.6: Estacionalidad de la precipitación

Debido a las variaciones espaciales de precipitación, en términos cuantitativos, los proyectos de almacenamiento y regulación se han enfocado en la parte alta de la cuenca, a fin de captar y almacenar el agua proveniente de las precipitaciones de la parte alta, para que sean utilizadas en la parte baja, en la que existe menos disponibilidad de este recurso.

Los registros de información mensual de precipitación para las 26 estaciones utilizadas en el presente estudio poseen menos del 5% de datos faltantes y son visualmente homogéneas.

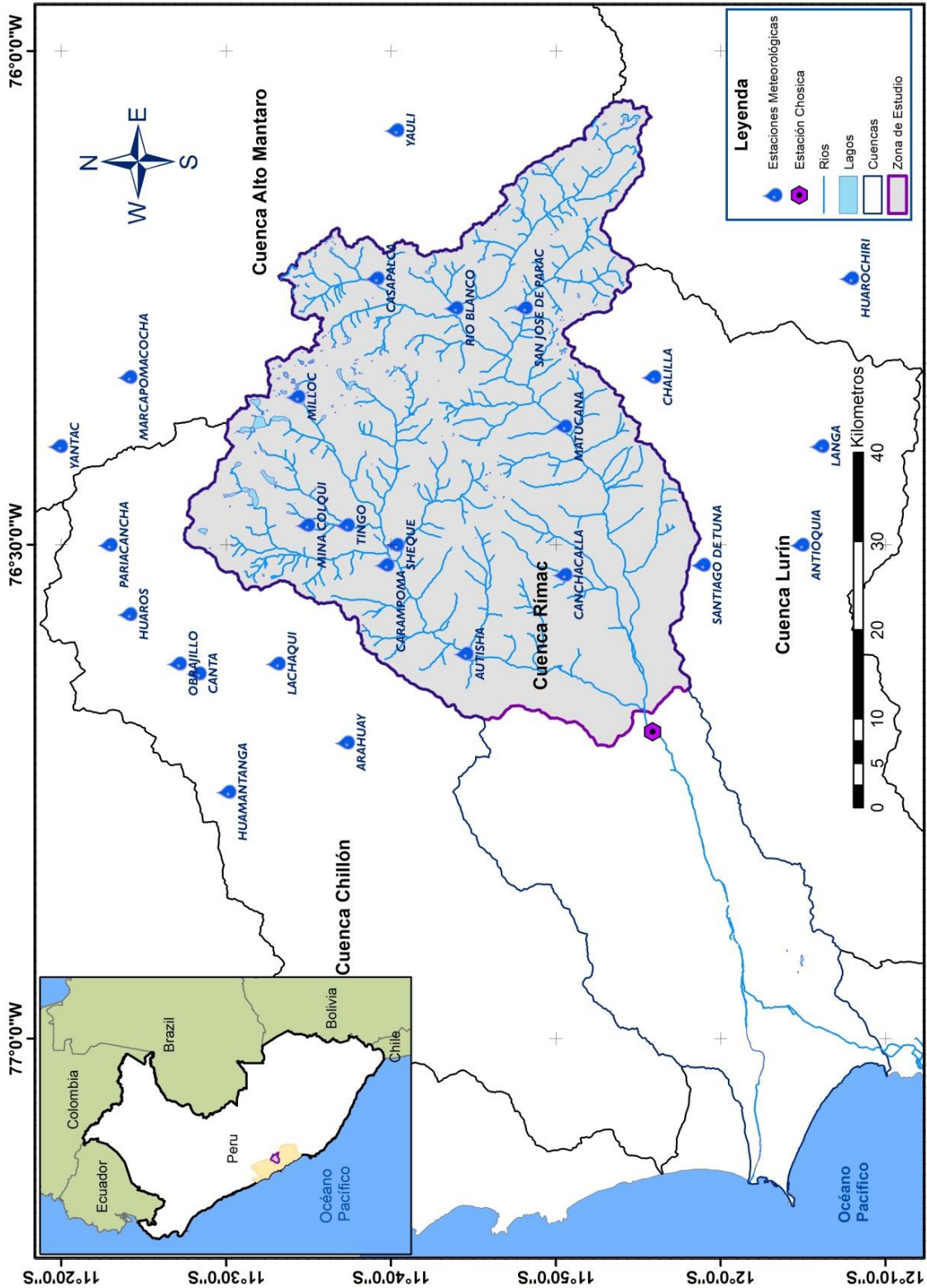


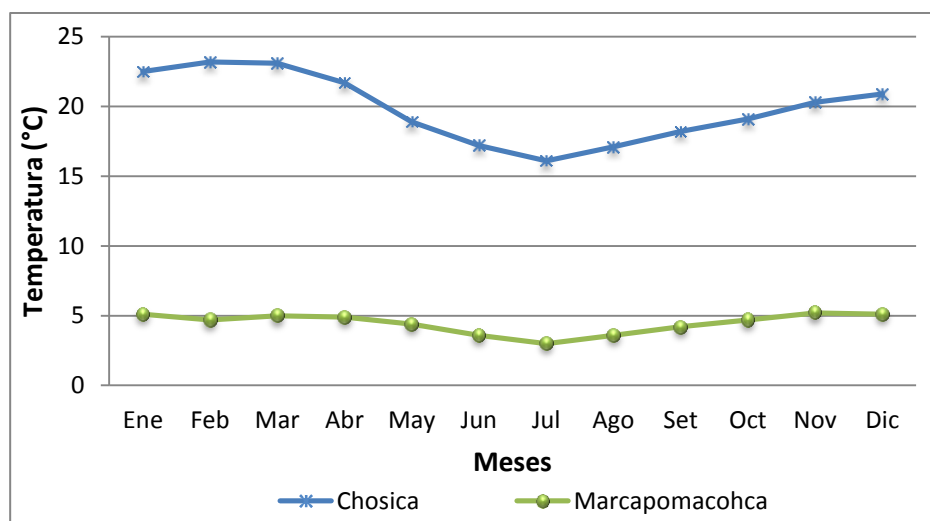
Figura 2.7: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas del estudio

Temperatura

En relación a la temperatura en la cuenca del Río Rímac, existe una diferencia marcada de temperaturas entre la parte alta, media y baja de la cuenca, debido a las diferentes zonas de vida existentes en la cuenca.

Sin embargo, la estacionalidad de las temperaturas promedio mensuales tiene un comportamiento similar en toda la zona de estudio, con temperaturas medias más bajas en el mes de julio, mientras que las más elevadas se registran en los meses de noviembre a marzo, por lo general centradas en Enero. En la [Figura 2.8](#), se muestra la estacionalidad característica de las temperaturas, con promedios mensuales multianuales de temperatura, para las estaciones meteorológicas de Chosica (906 msnm) y Marcapomacocha (4,479 msnm).

Figura 2.8: Estacionalidad de la temperatura-Estación Chosica y Marcapomacocha



Fuente: Elaboración propia

2.5. HIDROMETRÍA DE LA CUENCA

En la zona de estudio, existen tres estaciones hidrométricas: Chosica R-2, Sheque y Tamboraque, de las cuales, la primera es administrada por el SENAMHI y restantes por EDEGEL con registro de caudales.

Las estaciones de Sheque y Tamboraque, cuenta con registro de caudales desde 1965 en adelante, mientras que la estación Chosica R-2, tiene un registro de caudales diarios desde 1912 hasta la actualidad; por lo que, para los objetivos del presente estudio, se trabajó sólo con los datos de la estación Chosica R-2.

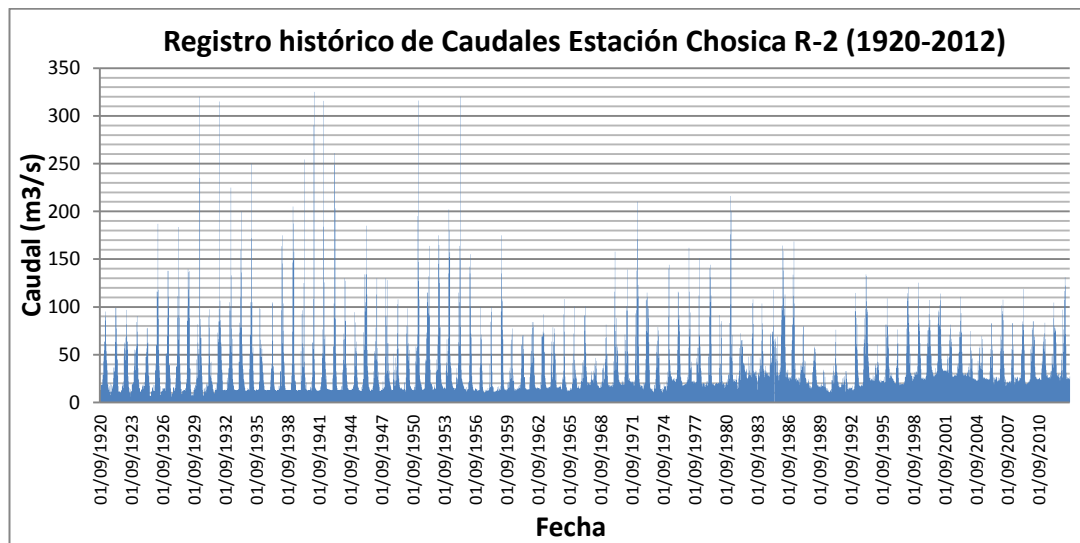
Estación Hidrométrica Chosica

La estación hidrométrica Chosica, geográficamente se localiza en las coordenadas geográficas de 11°55'48.5" de latitud sur y 76°41'23.8" de longitud oeste, y a una altitud de 906 msnm.

La ubicación de la actual estación Chosica R-2 viene operando en ese lugar desde el año 1968, pero desde 1920, las mediciones del caudal del Río Rímac se han realizado en otras 4 secciones diferentes del río: Chacrasana (1920-1945), puente Los Ángeles (1946-1951), Yanacoto (1952-1958) y Chosica R-1 (1959-1967).

El registro de datos hidrométricos de esta estación es de una resolución temporal diaria, con una longitud de registro desde 1920 hasta la actualidad, habiéndose considerado para el presente estudio la información del periodo de setiembre de 1920 a agosto del 2013. (Ver [Figura 2.9](#))

Figura 2.9: Caudales del Río Rímac (1920-2012).



Los caudales en la estación Chosica R-2 tienen una marcada estacionalidad, como se aprecia en la [Figura 2.10](#), en la cual se distingue el comportamiento unimodal de los caudales, con mayores caudales entre los meses de diciembre a mayo y caudales más bajos en los meses restantes y con el pico de caudales en el mes de marzo.

Asimismo, la curva de duración diaria de los caudales de la cuenca del Río Rímac a la altura de la estación Chosica R-2, se muestra en la [Figura 2.11](#), de la que se puede deducir que el 50 % del tiempo, los caudales diarios del Río Rímac son iguales o mayores a 20 m³/s, y el resto del tiempo son menores a este valor.

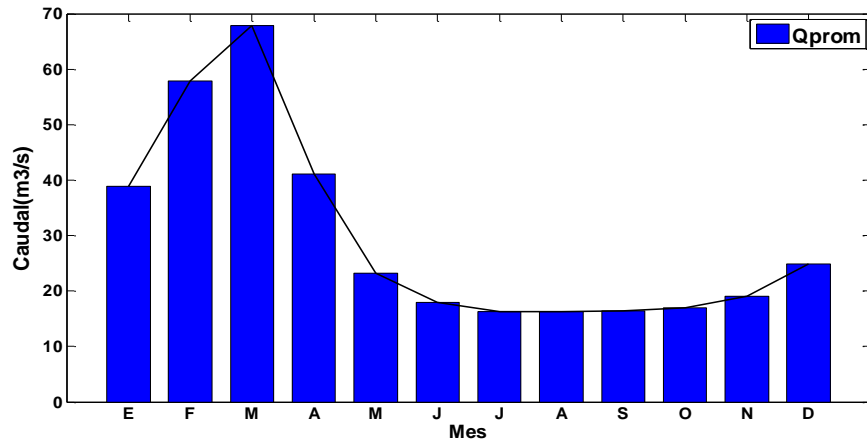


Figura 2.10: Estacionalidad de caudales – Cuenca Rímac (Chosica R-2)

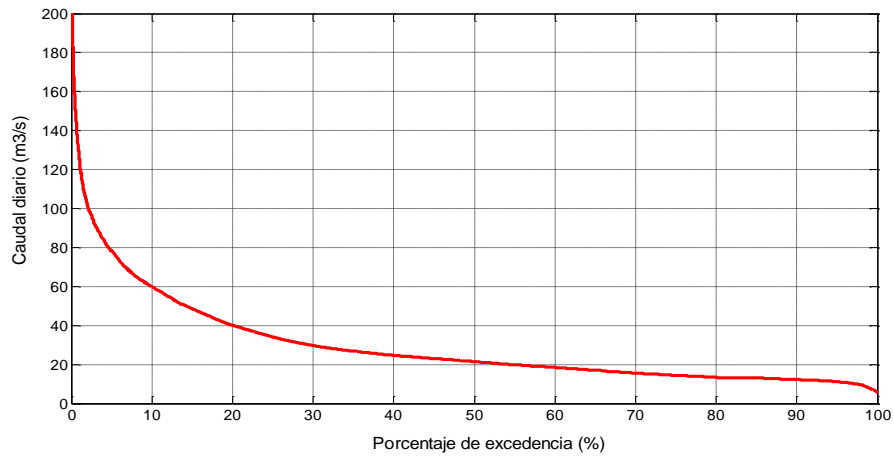


Figura 2.11: Curva de duración de caudales diarios – Cuenca Rímac (Chosica R-2)

III. MÉTODOS

A fin de facilitar el análisis hidrológico, se estructuró la información de caudales y de precipitación como año hidrológico: Setiembre (añoi) - Agosto (añoi+1).

En el presente estudio se utilizaron dos métodos complementarios para analizar las variaciones en el régimen de los caudales del Río Rímac, el Ecoflujo y la estimación de los Indicadores de Alteración Hidrológica (IAH), los cuales a su vez fueron correlacionados para determinar su relación.

3.1. Estimación de Anomalías de Precipitación

Para estimar las anomalías de precipitación por año de análisis y por estación (DEF, MAM, JJA, SON), fue necesario espacializar los datos a través de la interpolación para posteriormente estimar las anomalías correspondientes a los valores anuales o estacionales.

3.1.1 Interpolación

La interpolación de los datos de precipitación a nivel mensual se realizó con el objetivo de obtener la precipitación media sobre la zona de estudio; para tal fin se realizó la interpolación usando el módulo de *estimación de valores medio sobre una cuenca* del Hydraccess, mediante el método de Distancia Inversa Ponderada; obteniendo los valores medios mensuales para la zona de estudio, como se muestra en la [Figura 3.1](#).

Los valores medios mensuales luego fueron agregados para obtener la precipitación acumulada de cada año.

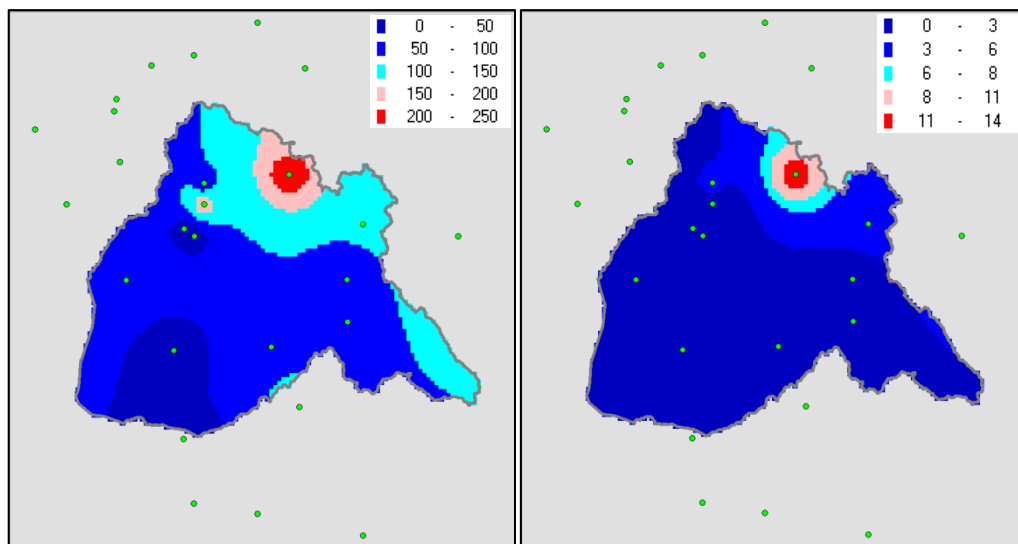


Figura 3.1: Interpolación espacial de la precipitación mensual. (a) Precipitación en un mes húmedo (enero), (b) Precipitación en un mes seco (julio). Los puntos verdes representan a las estaciones pluviométricas.

3.1.2 Anomalías de precipitación

Las anomalías de precipitación fueron estimadas en base a los valores de precipitación acumulada por año, obtenidas como resultado de la interpolación; para tal fin, se estimó la diferencia de los valores de precipitación acumulada de cada año con respecto al promedio de la precipitación acumulada de todos los años analizados.

3.2. Estimación del Ecoflujo

La metodología empleada en esta sección está basada en el análisis estadístico de los datos y el cálculo del ecodeficit y ecosuperávit en función a las curvas de duración de caudal; como se puede resumir en la [Figura 3.2](#).

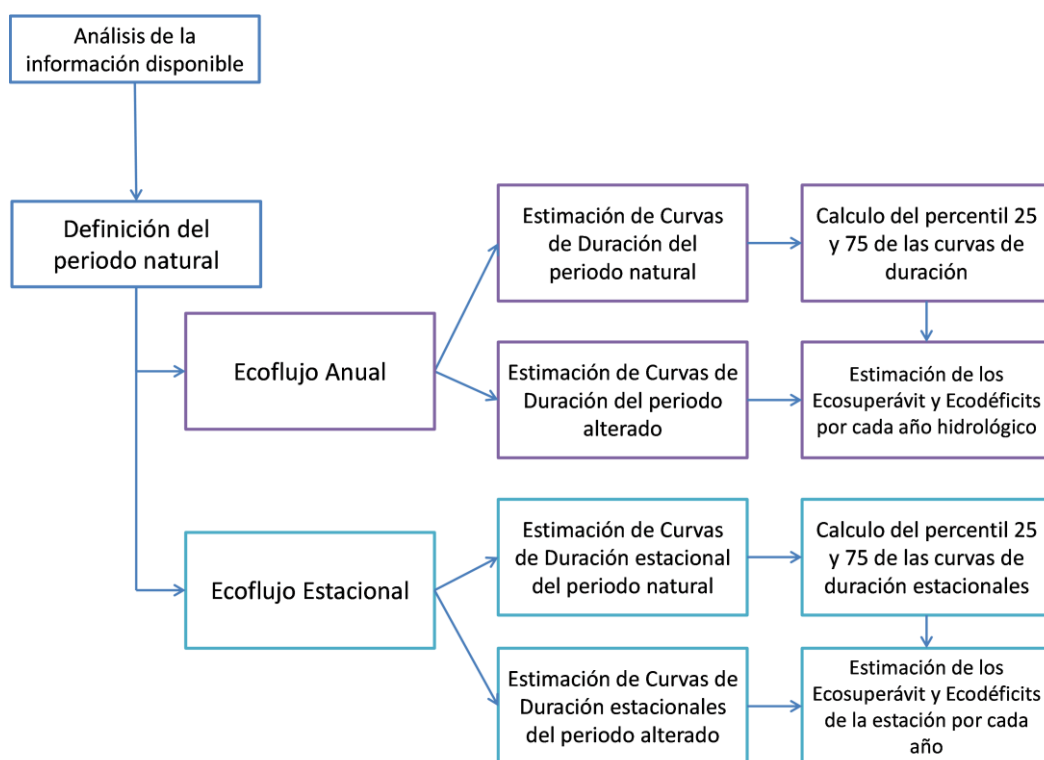


Figura 3.2: Esquema metodológico de la estimación del Ecoflujo

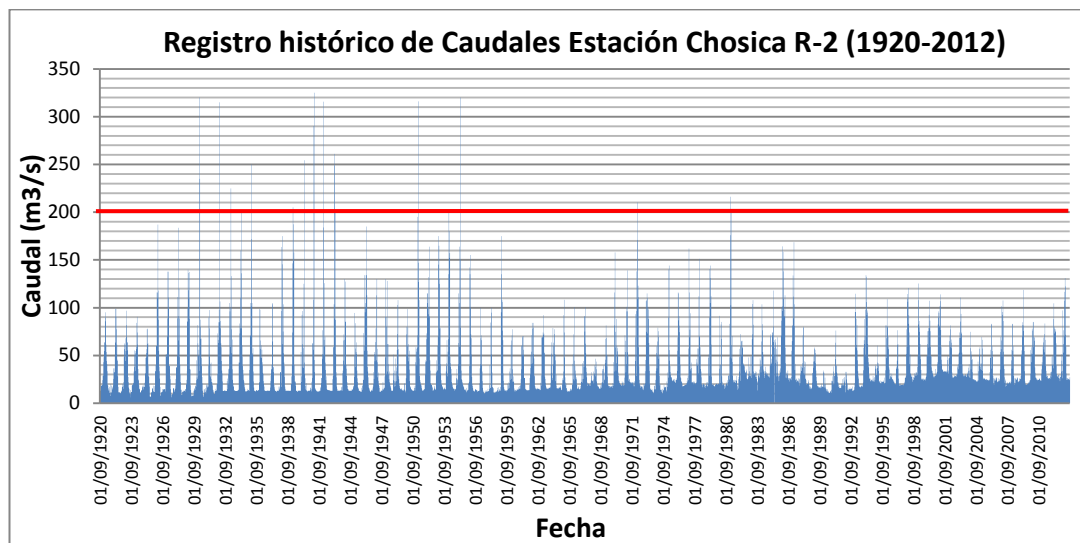
3.2.1 Análisis de la información disponible

Se realizó el análisis gráfico mediante el ploteo de los datos diarios ([Figura 3.3](#)), identificándose un total de 43 valores sobreestimados (atípicos) en el periodo de 1920 a 1960, con valores entre 200 a 350 m³/s, los cuales, si bien corresponden a valores de caudales extremos, son evidentemente exagerados tanto para las características hidráulicas del cauce del río Rímac, como para los registros de eventos extremos históricos en temporadas de avenidas. Como es el caso del desborde del río Rímac ocurrido el 03 de marzo de 1994, evento de gran magnitud (132.5 m³/s), generado un par de Kilómetros antes de la desembocadura del

río en el Pacífico, que abarcó alrededor de 50.3 hectáreas en la zona densamente ocupada en la Jurisdicción de la provincia constitucional del Callao, conocida como Cambetta Baja y otros barrios del Callao.

En base a este sustento técnico, se procedió a reemplazar los valores sobreestimados encontrados por un valor considerado como máximo razonable de 200 m³/s.

Figura 3.3: Caudales del Río Rímac (1920-2012). (La línea roja representa el límite de 200 m³/s considerado como evento extremo aceptable).



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Definición del periodo natural

Para la presente sección, se considera periodo natural a aquellos datos de caudales correspondientes a los años en los cuales la alteración del régimen de caudales a consecuencia de actividades antrópicas (cambio de uso del suelo, construcción de embalses, trasvase de agua de otras cuencas, etc.), es mínima o no se presenta.

La definición del periodo natural se hizo en base a información histórica recopilada de las intervenciones con obras de ingeniería realizadas en la cuenca del Río Rímac, desde los años 20's hasta la actualidad, con especial interés en las obras de regulación y transvase, relacionados con la alteración del régimen natural de los caudales de un río (Ver [Figura 3.4](#)).

En base a lo anterior, se definió como periodo natural, el periodo de 1920 a 1960, mientras que los años posteriores serán considerados como años del periodo alterado, a fin de poder evaluar el impacto en la alteración del régimen de los caudales del río Rímac, producto de la intervención en la zona de estudio.

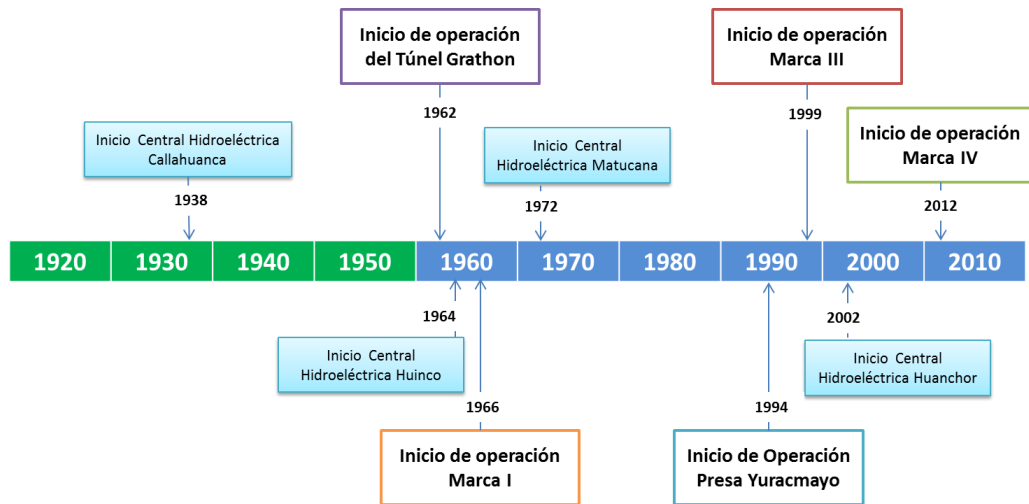


Fig. 3.4: Línea histórica de los proyectos desarrollados en la zona de estudio

3.2.3 Ecoflujo Anual o Estacional

Para abordar la estimación del Ecoflujo, es necesario, tener en cuenta los siguientes conceptos:

Ecosuperávit

El Ecosuperávit representa la cantidad de agua en abundancia a los requerimientos del ecosistema del río.

El Ecosuperávit es definido como el área entre la curva de duración de un determinado año o estación y el percentil 75 de las curvas de duración anual o estacional del periodo de caudales naturales; dividido entre el correspondiente promedio anual o estacional; para cuantificar mejor la fracción de Ecosuperávit. (Ver Figura 3.5)

Ecodéficit

El Ecodéficit representa la cantidad de déficit de agua para los requerimientos del ecosistema del río.

Se ha definido el Ecodéficit como el área entre la curva de duración de un determinado año o estación y el percentil 25 de las curvas de duración anual o estacional del periodo de caudales naturales; dividido entre el correspondiente promedio anual o estacional; para cuantificar mejor la fracción de Ecodéficit. (Ver Figura 3.5)

Curvas de Duración

Las curvas de duración de caudales (CDC) fueron estimadas en base a los datos diarios del caudal del Río Rímac y proveen una medida del porcentaje de tiempo en que un determinado caudal es igualado o excedido, para esto se grafica el caudal Q_i

versus su correspondiente probabilidad de excedencia, este último estimado en base a la ecuación (1):

$$p_i = i / (n + 1) \quad (1)$$

Dónde i es el rango (posición) que le corresponde a cada caudal luego de haber ordenado los caudales en orden descendente y n es el número de días de caudal. En base a lo anterior se elaboraron las CDC para cada año del periodo considerado, en base a los datos de todo el año o de la estación (trimestre), según sea el caso.

Una vez estimadas las CDCs para el periodo natural (1912-1960), se procedió a estimar el percentil 25 y 75 de las mismas, considerando al rango entre ambos percentiles como el rango de adaptación del ecosistema del río. Como muestra la Figura 3.5, dónde el percentil 25 es representado de color azul, el percentil 75 en color negro y una de las curvas de duración en color rojo.

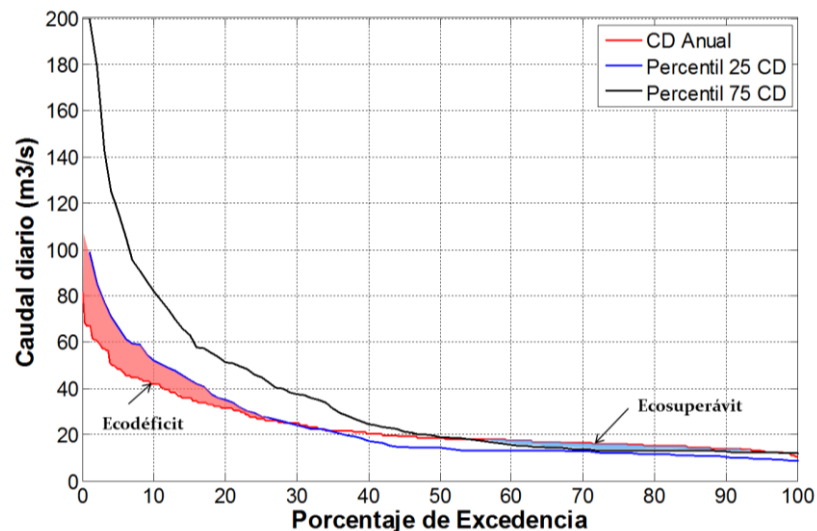


Figura 3.5: Definición de Ecosuperávit y Ecodéficit para el análisis del Ecoflujo.

La estimación del Ecoflujo se realizó tanto a nivel anual como estacional, a fin de conocer el comportamiento interanual e intra-anual de los caudales del Río Rímac.

En este sentido, para el Ecoflujo anual, se estimó el área entre las curvas de duración de cada año con los percentiles 25 y 75 correspondiente al periodo natural (1920-1960), considerándose como ecosuperávit al área por encima del percentil 75 y como ecodéficit el área por debajo del percentil 25; finalmente, cada ecodéficit y ecosuperávit se dividió entre su correspondiente promedio de caudal anual, a fin de conocer la proporción de cambio.

Para el Ecoflujo estacional, se procedió de manera similar al Ecoflujo anual, con la diferencia de que se consideraron los valores acumulados de periodos trimestrales teniendo en cuenta la estacionalidad de los datos, de modo que para temporada de

avenidas se consideró: diciembre-enero-febrero (DEF) y marzo-abril-mayo (MAM), y, para temporada de estiaje se consideró: junio-julio-agosto (JJA) y setiembre-octubre-noviembre (SON).

Finalmente, es importante mencionar que, se utilizó el método gráfico de cajas (Boxplot), para graficar a nivel decadal los cambios en el ecosurplus y ecodéficit tanto anual como estacional, a fin de poder analizar la variabilidad del Ecoflujo a nivel inter-anual (décadas).

3.3. Estimación de los IAH

Los indicadores están basados en las cinco características fundamentales del régimen hidrológico:

Magnitud

La magnitud de la condición del agua en cualquier momento dado es una medida de la disponibilidad o idoneidad del hábitat y define los atributos de dicho hábitat como área húmeda o volumen de hábitat, o la posición de la capa freática relacionada a humedales o zonas ribereñas de enraizamiento de plantas.

El tiempo

El tiempo de ocurrencia de condiciones particulares del agua puede determinar si determinados requerimientos del ciclo de vida son cumplidos o si pueden influenciar el grado de estrés o mortalidad asociada con condiciones de agua extremas tales como inundaciones o sequías.

Frecuencia

La frecuencia de ocurrencia de condiciones de agua específicas como las sequías o inundaciones pueden estar vinculadas con eventos de reproducción o mortalidad de varias especies, con ello influir en la dinámica poblacional.

Duración

La duración de tiempo en el que una condición específica del agua se da puede determinar si una fase en particular del ciclo de vida puede ser completado o el grado en que se pueden acumular dichos efectos de estrés tales como inundación o sequía.

Tasa de Cambio

La tasa de cambio en las condiciones del agua pueden estar vinculadas al varamiento de determinados organismos a los largo de las orillas o a la habilidad de las raíces de las plantas de mantener contacto con fuentes de agua freática.

Los IAH comprenden 33 parámetros divididos en cinco grupos, el primer grupo (12 parámetros) está conformado por el porcentaje de cambio entre en periodo natural y alterado de los caudales promedios de cada mes, el segundo grupo (12 parámetros) lo conforman los cambios en los días de mínimo y máximo, junto con el índice de caudal base, el tercer grupo (2 parámetros) está

representado por el cambio en la fecha de caudal mínimo y máximo, el cuarto grupo (4 parámetros) expresa los cambios en cantidad y duración de los caudales bajos y altos, finalmente el quinto grupo (3 parámetros) expresa el cambio en las tasas de ascenso y descenso (The Nature Conservancy, 2009). En el presente estudio no se consideró el indicador denominado “Cantidad de días con caudal cero” perteneciente al grupo dos de los IAH, esto debido a que no se presentaron valores cero en todo el periodo de análisis.

Cuadro 5.2: Resumen de los parámetros IAH

Grupo de parámetros IAH	Parámetros hidrológicos
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la media o la mediana para cada mes calendario <i>Subtotal 12 parámetros</i>
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Mínimos anuales, media de 1 día Mínimos anuales, medias de 3 días Mínimos anuales, medias de 7 días Mínimos anuales, medias de 30 días Mínimos anuales, medias de 90 días Máximos anuales, media de 1 día Máximos anuales, medias de 3 días Máximos anuales, medias de 7 días Máximos anuales, medias de 30 días Máximos anuales, medias de 90 días Cantidad de días con caudal cero Índice de flujo de base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual <i>Subtotal 12 parámetros</i>
3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día <i>Subtotal 2 parámetros</i>
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días) Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días) <i>Subtotal 4 parámetros</i>
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos Cantidad de inversiones Hidrológicas <i>Subtotal 3 parámetros</i>
5 grupos de parámetros	Total 33 parámetros

Los IAH se estimaron haciendo uso del Software IHA-Indicadores de Alteración Hidrológica, versión 7.1.0.10, considerando los mismos datos diarios de caudales (1920-2012), teniendo en cuenta el mismo periodo natural utilizado para el Ecoflujo (1912-1960) y para un comportamiento no paramétrico de los datos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN

Las anomalías de precipitación anual estimadas para el periodo de disponibilidad de información de precipitación en la cuenca (1964-2012), se muestran en la [Figura 4.1](#), en la cual resaltan las alternancias entre periodos con alteraciones positivas y negativas, y las fuertes anomalías negativas de precipitación de los años 1967, 1989 y 1991, así como las anomalías positivas en los años 1983 y de 1997 al 2000; las cuales posiblemente fueron influenciadas por fenómenos climáticos a gran escala.

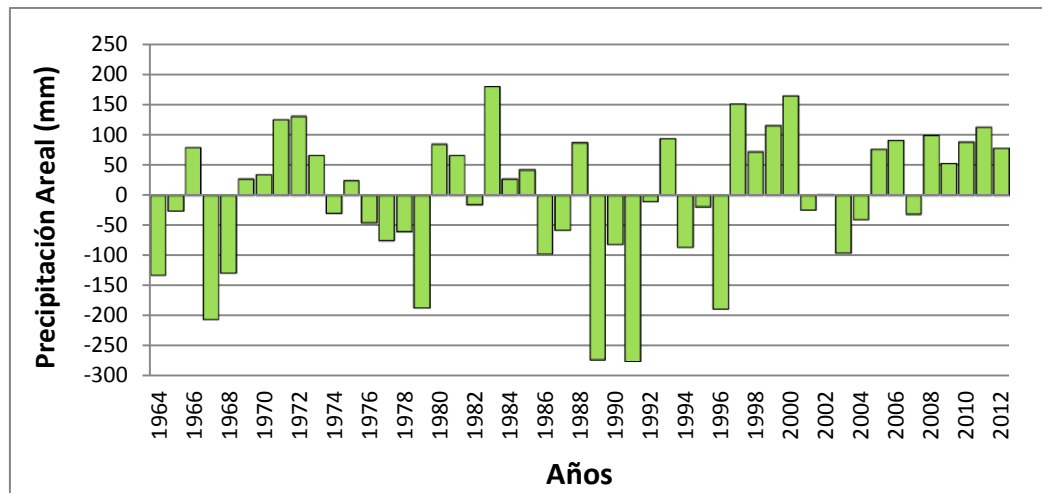


Figura 4.1: Anomalía de la precipitación areal anual-cuenca Río Rímac

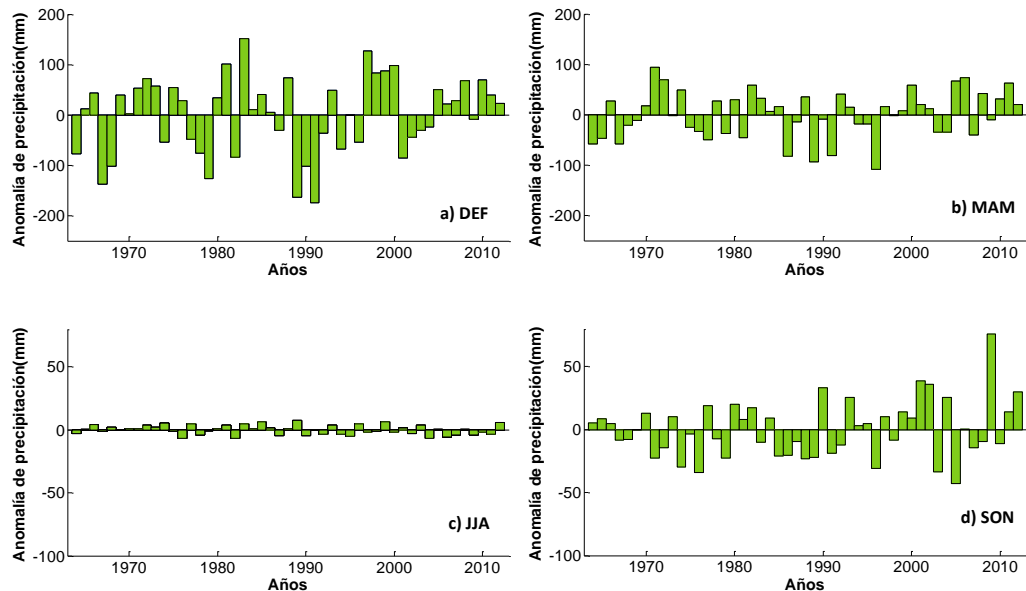


Figura 4.2: Anomalías de precipitación areal estacional – cuenca Río Rímac

Asimismo, las anomalías de precipitación estacional, se muestran en la [Figura 4.2](#) y reflejan las diferencias en magnitud y comportamiento de las anomalías de la precipitación

en los diferentes periodos estacionales, en la que destaca que las fuertes anomalías negativas detectadas a nivel anual reflejaron las anomalías negativas en la temporada húmeda (DEF y MAM).

4.2. ECOFLUJO

4.2.1 Análisis de Ecoflujo Anual

La [Figura 4.3](#), muestra los ecosuperávits y ecodéficits para el periodo de 1920 al 2012 y se puede apreciar que, desde 1962 en adelante se presentaron caudales elevados, mayores al percentil 75 de la curva anual de duración, por lo que este es un periodo con caudales mayores respecto de los caudales naturales, y, mayores a los requerimientos del ecosistema del río; asimismo, se acrecentó la frecuencia y magnitud de los déficits de caudales en determinados años, entre los cuales los más resaltantes son los de los años 1989 y 1991.

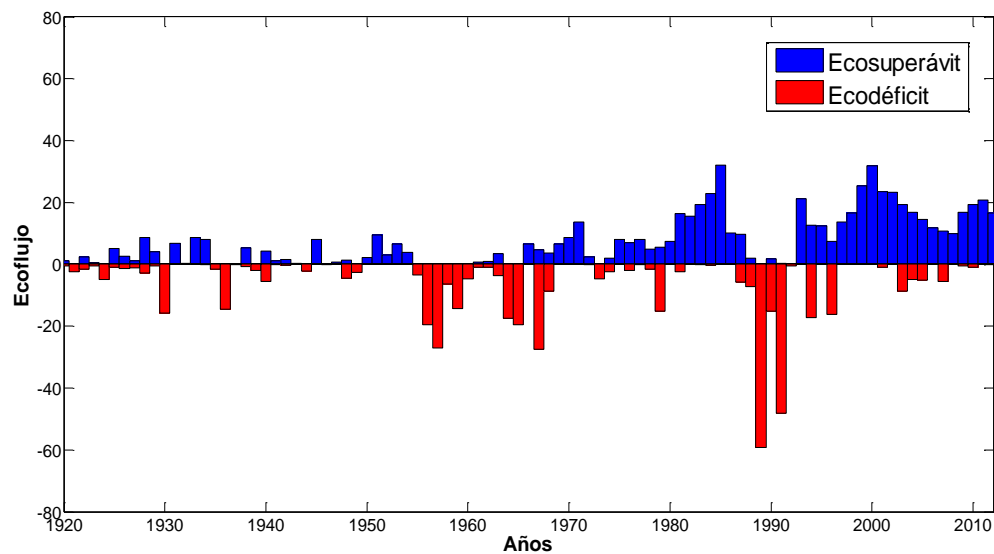


Figura 4.3: Ecoflujo Anual de los caudales del Río Rímac para el periodo 1920 al 2012.

En la [Figura 4.4](#), se aprecia el incremento de la variabilidad en los ecosuperávits (caudales altos) anuales, definido por el tamaño de las cajas, el cual se ha venido incrementando desde la década de los 60's en adelante; mientras que, el valor medio anual de los ecodéficits muestran un ciclo de incrementos y reducciones a partir de la década de los 50's, con dos reducciones extremas en las décadas de los 80's y 90's y una notoria reducción en la magnitud y variabilidad de los déficits en la última década.

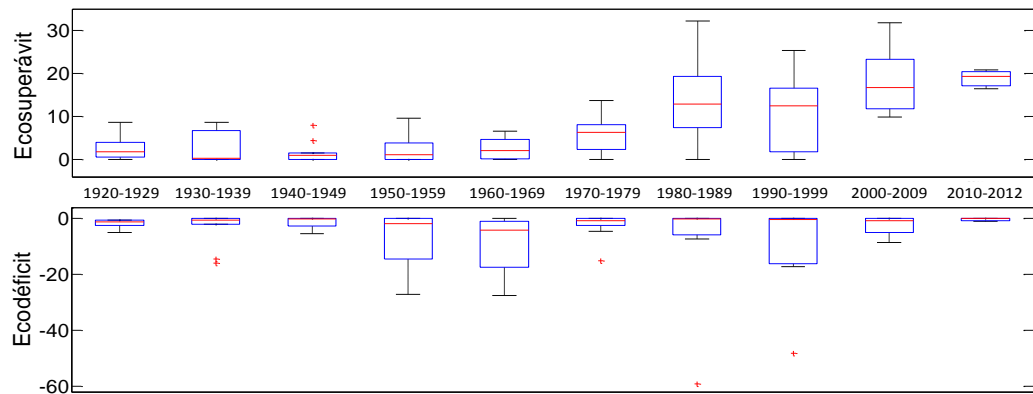


Fig. 4.4. Boxplot de cambios decadales del Ecosuperávit y Ecodéficit

Asimismo, para complementar el análisis de ecoflujo de los caudales se relacionaron éstos con las anomalías de precipitación, a fin de analizar la relación entre ambas variables; la relación entre el Ecoflujo y las anomalías de precipitación se muestran en la [Figura 4.5](#). En la que se puede apreciar que la variación temporal de los caudales bajos (Ecodéficits) del Río Rímac guardan correspondencia con las anomalías negativas de precipitación media anual para la zona de estudio, es decir, que los balances negativos en el caudal anual parecen ser resultado de una anomalía negativa en la precipitación, sin embargo, los caudales altos anuales del Río Rímac muestran un comportamiento no estrictamente relacionado a las anomalías positivas de precipitación, particularmente a partir de los años 80, lo cual sería consecuencia de las obras de regulación implementadas en este periodo (principalmente Marca III y Marca IV). Además, resalta el hecho de que los Ecodéficits extremadamente bajos (1989 y 1991), se deben a fuertes anomalías de precipitación, lo que refleja una dependencia de los Ecodéficits de la cuenca, con la precipitación, a pesar de la infraestructura de regulación.

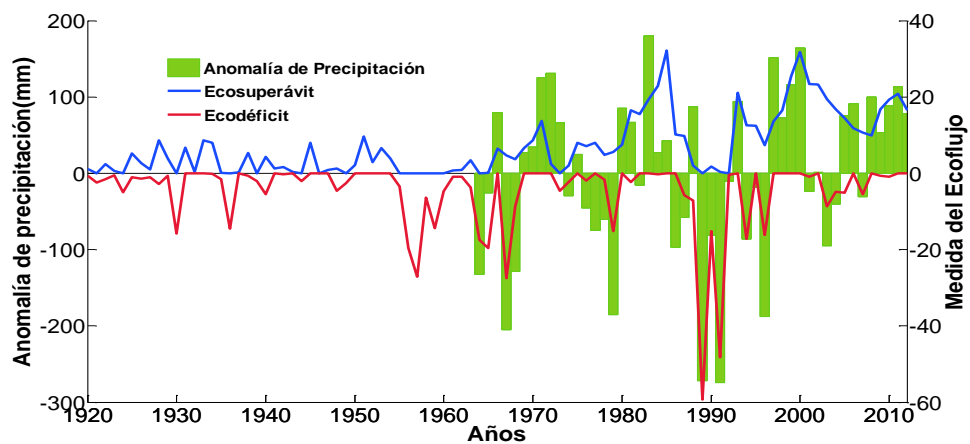


Fig. 4.5. Cambios en el Ecoflujo anual y las anomalías de precipitación

4.1.2 Análisis de Ecoflujo Estacional

Se analizaron los cambios estacionales en los Ecosuperávit y Ecodéficits, tanto de manera interanual como inter-decadal; teniendo en cuenta dos periodos: temporada de avenidas (diciembre a febrero - DEF y marzo a mayo-MAM) y temporada de estiaje (junio a agosto - JJA y setiembre a noviembre-SON).

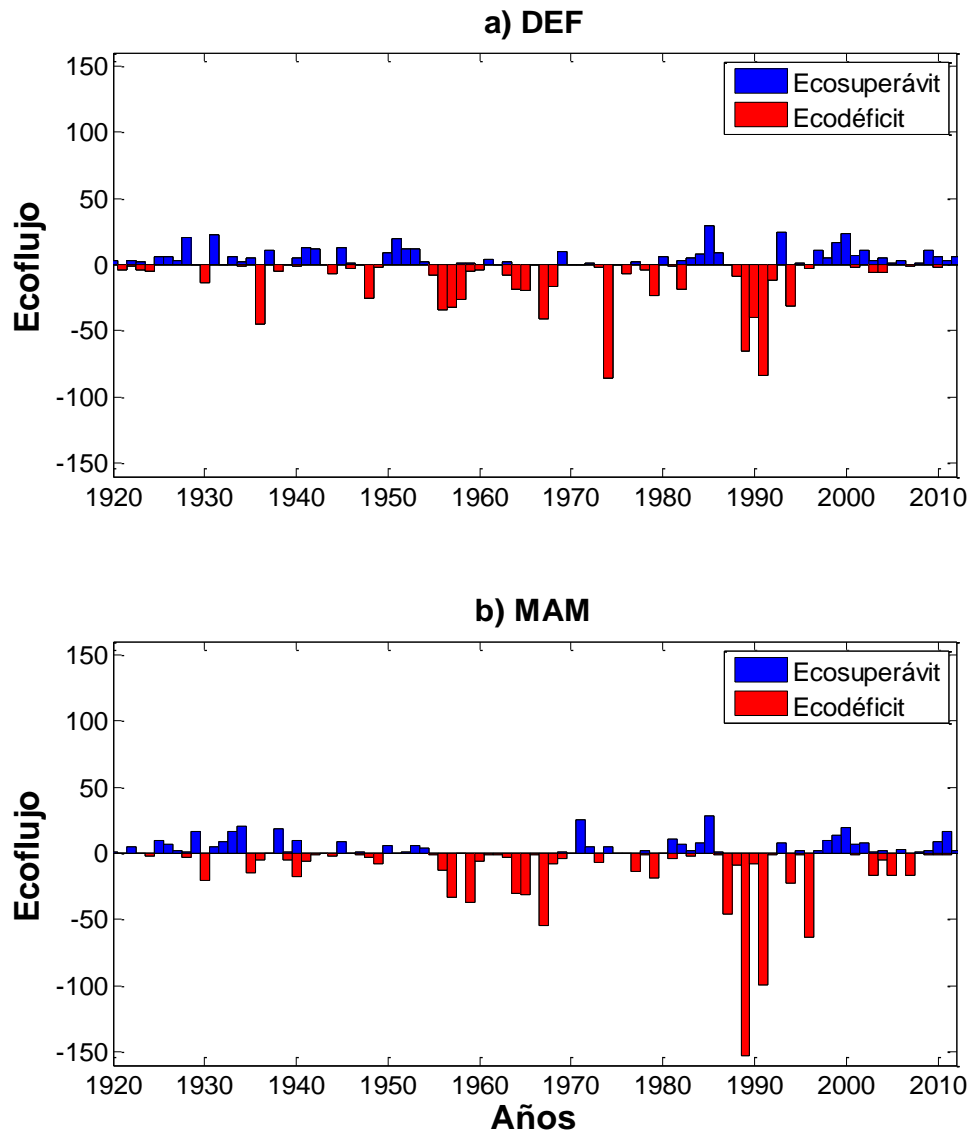


Figura 4.6: Cambios en el Ecoflujo estacional – temporada de avenidas: a) DEF; b) MAM

La Figura 4.6, muestra los cambios en el ecoflujo de manera trimestral para la temporada de avenidas (diciembre-mayo), apreciándose que en este periodo se presenta casi la totalidad de los Ecodéficits que se reflejan a nivel anual, con una evidente tendencia al incremento de los Ecodéficits para el periodo alterado y con Ecodéficits resaltantes en 1974 (DEF) y entre los años 1989 a 1991 en toda la temporada de avenidas; a diferencia de los escasos superávit, de pequeña magnitud, sin variación resaltante entre el periodo natural y el periodo alterado.

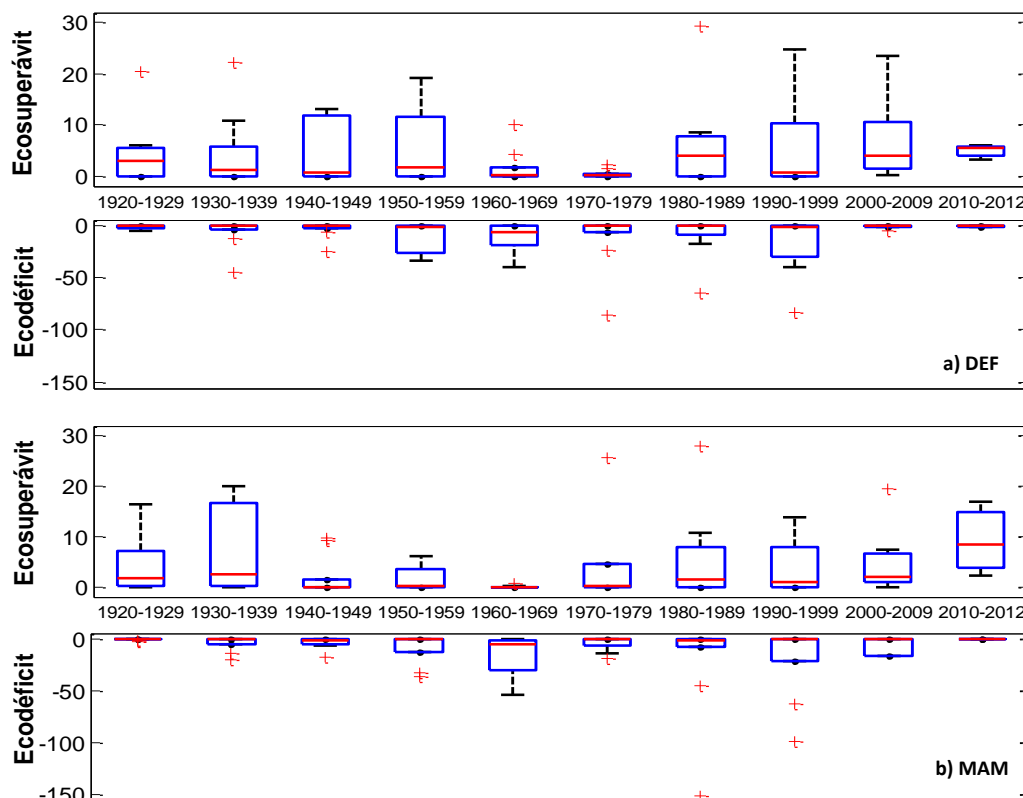


Figura 4.7: Boxplot de cambios estacionales decadales en el Ecoflujo: a) DEF, b) MAM

En relación a la variabilidad de los cambios decadales, la Figura 4.7, muestra la variabilidad del ecobalance en la temporada de avenidas; en la que resalta la tendencia al incremento en la variabilidad de los ecosuperávits a partir de los años 80's hasta la actualidad, así como la reducción en magnitud y variabilidad de los ecodéficits en la temporada de avenidas en las dos últimas décadas; esto último nos indica que los ecodéficits de caudal fueron compensados por las infraestructuras de regulación construidas en la parte alta de la cuenca del Río Rímac.

Los datos aislados de los gráficos de cajas (boxplots), que se muestran con una cruz roja, representan los valores extremos, en el caso de los ecodéficits, se presentaron durante las décadas 70, 80 y 90's, durante la temporada de avenidas.

Para la temporada de estiaje (JJA y SON), se tiene un comportamiento de los ecodéficit y ecosuperávit totalmente diferente al de la temporada de avenidas, con una clara predominancia de ecosuperávits en los 6 meses de esta temporada.

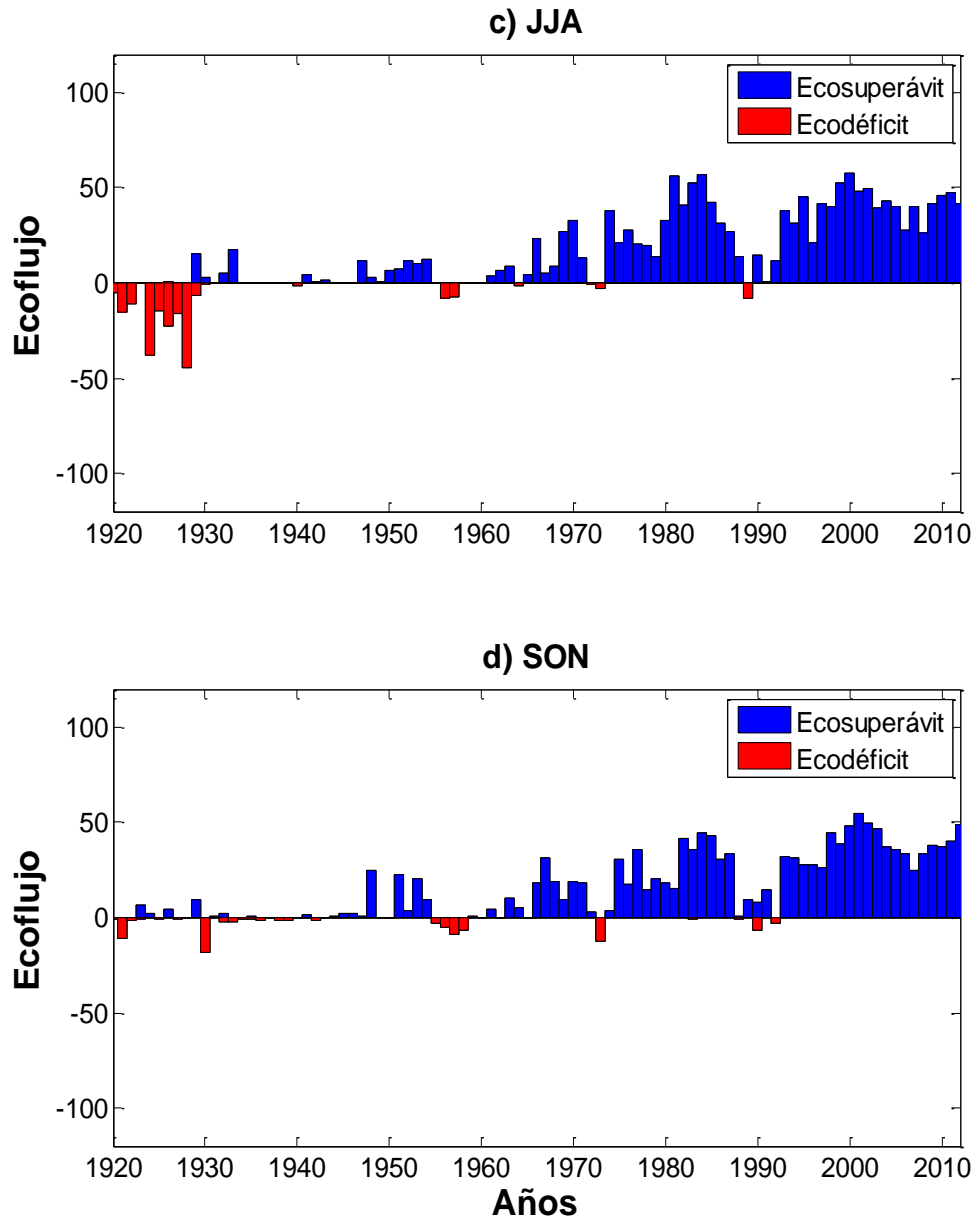


Figura 4.8: Cambios en el Ecoflujo estacional – temporada de avenidas: c) JJA; d) SON

En la Figura 4.8, se muestran los cambios en el ecobalance de manera trimestral para la temporada de estiaje, en la cual resalta el incremento de los ecosuperávit a partir de los años 60's, con una reducción de los mismos en el periodo de 1989 a 1991, en concordancia con los ecodéficits del gráfico correspondiente al periodo húmedo, lo que se explica por el escaso almacenamiento que se tuvo en los reservorios durante la temporada de avenidas correspondientes a los mencionados años. Asimismo, resaltan los ecodéficits del trimestre JJA, durante el periodo de 1920 a 1930 (perteneciente al periodo natural), como consecuencia de la dependencia los caudales de este periodo con la estacionalidad de las precipitaciones, por la ausencia de estructuras de regulación.

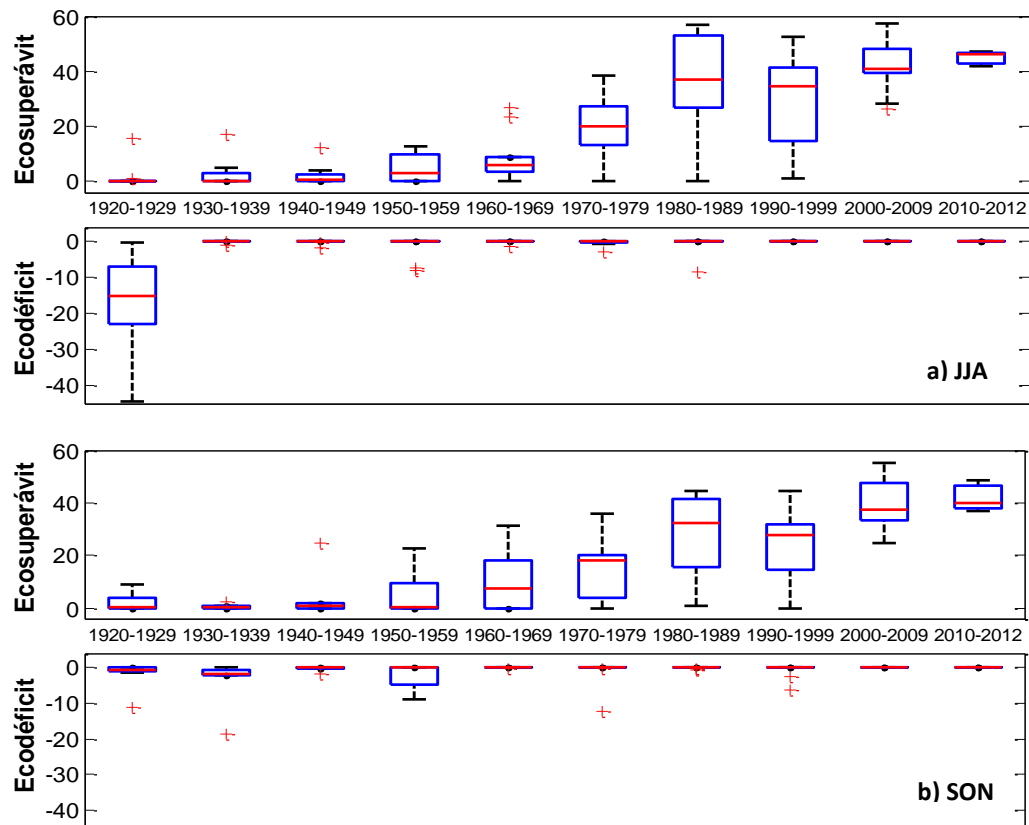


Figura 4.9: Cambios en el Ecoflujo estacional – temporada de avenidas: a) JJA; b) SON

La Figura 4.9, muestra la variabilidad del ecobalance en la temporada de estiaje, resaltando el fuerte incremento en la variabilidad y magnitud de los ecosuperávits a partir de los años 70's, con una menor variabilidad en las últimas décadas; asimismo, es evidente la reducción de los ecodéficits a partir de los años 60's hasta la actualidad, como resultado de la compensación de los caudales bajos, gracias a las estructuras de regulación de la parte alta de la cuenca del Río Rímac.

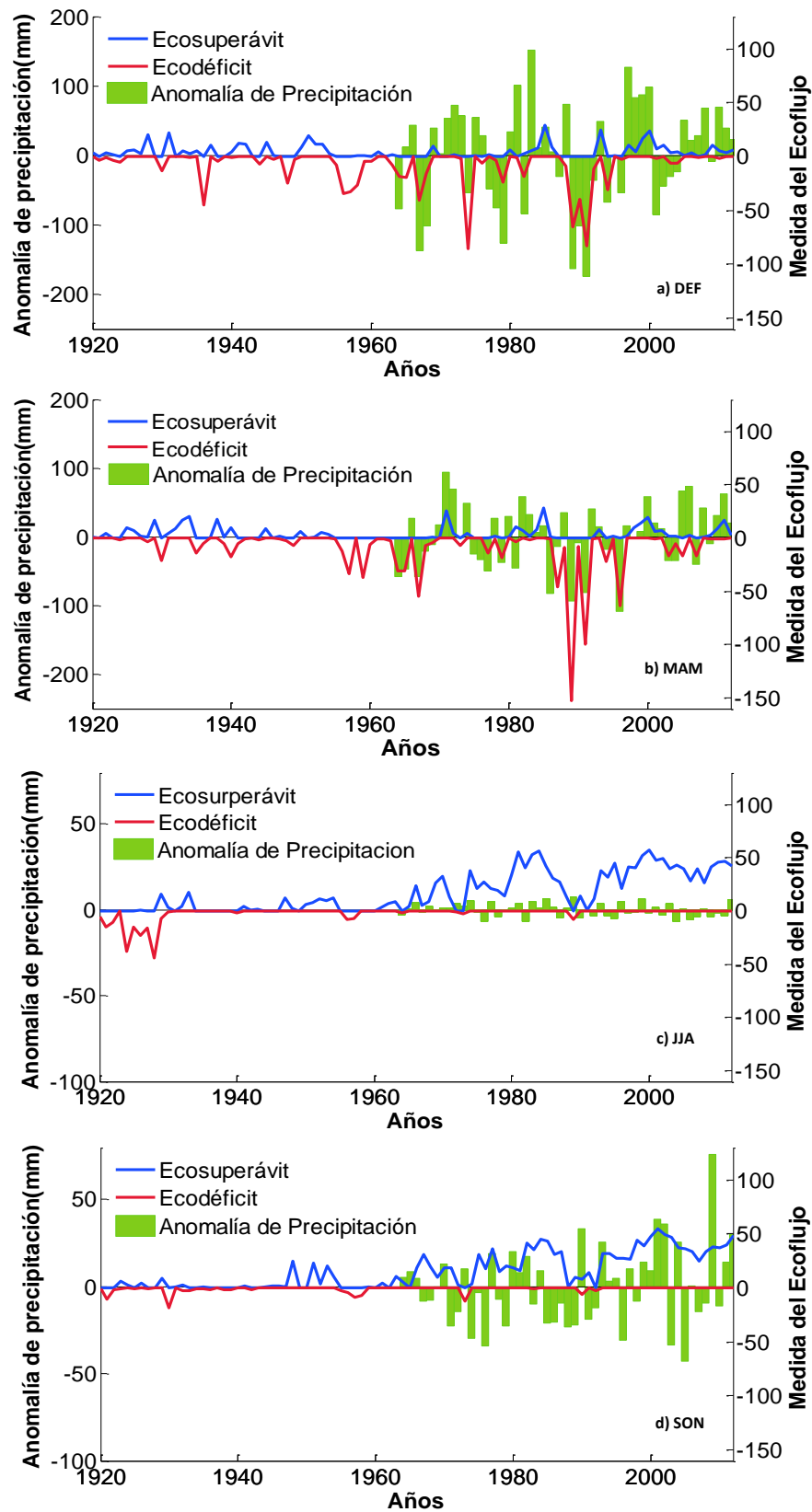


Figura 4.10: Cambios en el Ecoflujo estacional y anomalías de precipitación: a)DEF, b)MAM, c)JJA, d)SON.

En la [Figura 4.10](#), se puede apreciar claramente que, a partir de los años 60 (periodo alterado), casi la totalidad de los Ecodéficits se presentan en los meses de DEF y MAM (Fig. 8a y 8b), con una fuerte correspondencia con las anomalías negativas de precipitación, asimismo, los Ecosuperávits para estos dos trimestres son escasos y estrechamente relacionados a las anomalías positivas de precipitación.

Lo contrario sucede en los meses de JJA y SON, en los que hay un notorio incremento y predominancia de Ecosuperávits a partir de los años 60, con una clara disociación de los Ecosuperávits con las anomalías de precipitación para JJA y SON, posiblemente debidas a la mayor influencia de los reservorios en estos últimos trimestres (Fig. 8c y 8d).

Asimismo, es importante resaltar en los meses de JJA y SON dos intervalos marcados, el primero (entre 1960 y 1990), bajo la influencia de las infraestructuras del Túnel Grathon y Marca I, con Ecosuperávits más variables y de menos magnitud en comparación con el segundo intervalo (entre 1991 y el año 2012), el cual presenta mayor estabilidad y magnitud en los Ecosuperávits, debido a la incorporación de los proyectos de la Presa Yuracmayo, Marca III y Marca IV.

Lo anterior nos indica que en el Río Rímac, los caudales bajos (Ecodéficits) se dieron durante la temporada lluviosa como consecuencia de una anomalía de precipitación negativa en este periodo, que coincide con el almacenamiento de los reservorios instalados en la zona de estudio; los caudales altos (Ecosuperávits) predominaron en la temporada seca, como resultado de anomalías positivas de precipitación y la descarga de los reservorios, con una mayor influencia de los reservorios en JJA y SON.

Adicionalmente se evaluó la correlación del Ecoflujo con la precipitación (1964-2012), como se muestra en la [Tabla 3](#), en la temporada lluviosa (DEF y MAM), existe correlación positiva (negativa) significativa entre el Ecosuperávit (Ecodéficit) y la precipitación estacional correspondiente, con una correlación más fuerte con los Ecodéficits, lo que confirma y refuerza la deducción gráfica de la sección previa de que los caudales bajos en esta temporada son causados principalmente por cambios en la precipitación; para la temporada seca las correlaciones son más débiles, JJA no es posible definir correlación válida entre la precipitación y el Ecodéficit debido a que éste último es una serie con ceros casi en su totalidad, mientras que en SON, hay una débil correlación positiva significativa entre el Ecosuperávit y la precipitación, esto último indica que los cambios en los caudales en la temporada seca, principalmente en SON están influenciados por otros factores como la operación de los reservorios.

Tabla 3.

Coefficientes de correlación entre el Ecoflujo y la precipitación estacional. ES: Ecosuperávit y ED: Ecodéficit. Los valores de *r* resaltados en negrita son los estadísticamente significativos.

Correlación	DEF		MAM		JJA		SON	
	ES	ED	ES	ED	ES	ED	ES	ED
<i>r</i>	0.351	-0.662	0.433	-0.609	-0.030	0.285	0.284	0.134

4.3. INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA-IAH

Se encontró una clara variación intra-anual de los caudales del Río Rímac, en el periodo alterado (1961-2012) con respecto al periodo natural (1920-1960), con un incremento promedio en los caudales de 8 m³/s, en los meses de junio a noviembre, correspondientes a la temporada seca y una reducción promedio de los mismos de 13 m³/s en los meses de febrero y marzo, correspondientes a la temporada lluviosa; lo cual sería consecuencia de los proyectos de regulación implementados en la cuenca. Sin embargo, se mantiene el comportamiento estacional con caudales promedios más altos en el mes de marzo, en el mes de marzo para ambos periodos (natural y alterado)

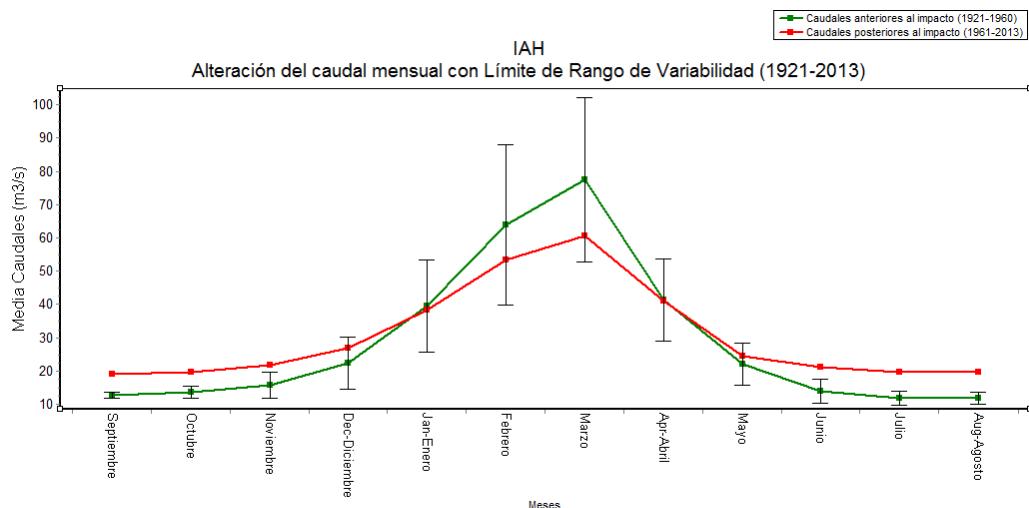


Figura 4.11: Variabilidad intra-anual para el periodo natural (1920-1960) y alterado

La [Tabla 4](#) muestra el porcentaje de cambio de los 32 IAH entre los periodos de estudio, esto nos brinda un mayor detalle de los cambios en el régimen de los caudales.

Tabla 4.

Cambios en los IAH para los periodos de análisis: Natural (1920-1960) y Alterado (1961-2012). Los números en negrita son cambios mayores a 10%

Parámetros IHA	1920-1960	1961-2012	% de cambio
Grupo de parámetros #1			
Septiembre	13.02	19.47	49.54
Octubre	13.05	19.6	50.19
Noviembre	14.18	20.81	46.76
Diciembre	17	23.36	37.41
Enero	35.1	33.34	-5.01
Febrero	52.7	48.04	-8.84
Marzo	66.5	55.1	-17.14
Abril	38.9	35.99	-7.48
Mayo	21	22.25	5.95
Junio	13.05	20.99	60.84
Julio	12.27	19.38	57.95
Agosto	12	19.65	63.75
Grupo de parámetros #2			
1-día mínimo	10.5	12.5	19.05
3-días mínimo	10.97	14.81	35.00
7-días mínimo	11.15	15.58	39.73
30-días mínimo	11.66	16.75	43.65
90-días mínimo	12.67	18.09	42.78
1-día máximo	155	105.9	-31.68
3-días máximo	141.3	99.77	-29.39
7-días máximo	132	88.52	-32.94
30-días máximo	90.01	68.93	-23.42
90-días máximo	62.08	53.64	-13.60
Índice caudal base	0.3647	0.5225	43.27
Grupo de parámetros #3			
Fecha de caudal mín.	243	239.5	-1.44
Fecha de caudal máx.	65	63.5	-2.31
Grupo de parámetros #4			
Conteo pulsos bajos	4	1	-75.00
Duración pulsos bajo	7	1	-85.71
Conteo pulsos altos	3	5	66.67
Duración pulsos alto	17	5	-70.59
Grupo de parámetros #5			
Tasa de subida	2	1.416	-29.20
Tasa de bajada	-1.5	-1.505	0.33
Número de reversas	85	164.5	93.53

En el grupo #1, los meses de Junio a Noviembre mostraron alteraciones positivas elevadas entre 46.8% y 63.8%, lo que indica un incremento en los caudales en éstos meses y que es congruente con los Ecosuperávits presentes en este periodo, mostrados en las Figuras 4.10 c) y 4.10 d); mientras que en los meses de Diciembre a Febrero, se tiene un cambio de 37.4% para el mes de diciembre y cambios negativos menores a 10% para los dos meses restantes, por lo podemos afirmar que los pequeños Ecosuperávits mostrados en la Figura 4.10 a) son consecuencia de un incremento en los caudales en el mes de diciembre y los Ecodéficits corresponderían a las reducciones en los caudales en los meses

de enero y febrero; asimismo, en los meses de marzo a mayo, se presentan tasas de cambios negativas en Marzo (-17.1%) y Abril (-7.5%), responsables de los fuertes Ecodéficits mostrados en la [Figura 4.10 b](#)), mientras que el mes de mayo (5.9%) sería el responsable de los pequeños Ecosuperávits, mostrados en la misma figura.

En el grupo #2, los indicadores del número de días de caudal mínimo se han incrementado en un porcentaje mayor a 19% en comparación con el periodo natural, mientras que los indicadores del número de días de caudal máximo se han reducido en un porcentaje mayor a 13.6%, además, el índice de caudal base se incrementó en un 43.3% en promedio.

En el grupo #3, se encontró una pequeña alteración, menor al 3%, en las fechas de caudal máximo y mínimo en promedio, a una fecha anterior en el periodo regulado, con respecto al periodo natural; es decir, ocurrencia de caudales máximos 2 días antes en promedio durante el mes de marzo y caudales mínimos 4 días adelantados durante el mes de setiembre.

En el grupo #4, se observa que se produjo una reducción de los sucesos extremos de caudales bajos en duración y frecuencia, en un 85% y 75 %, respectivamente; mientras que los sucesos extremos de avenidas incrementaron su frecuencia en un 66% pero se redujo su duración en un 70%, lo que nos indica un caudal más estable para el periodo alterado. Finalmente en el grupo #5, se aprecia una reducción de la tasa de subida, que implica una menor rapidez de incremento de los caudales durante un evento de crecida.

4.4. IMPLICANCIAS DEL CAMBIO EN EL RÉGIMEN DE CAUDALES EN EL RÍO RÍMAC

De los análisis anteriores se deduce que lo mayores cambios en el régimen de los caudales del Río Rímac están relacionados con la reducción de los caudales máximos en la temporada lluviosa, el incremento de los caudales mínimos en la temporada seca y la reducción en la velocidad de incremento de los caudales.

El incremento de los caudales en la temporada seca, incrementaría el transporte de sedimentos de fondo en esta temporada, que anteriormente fue de acumulación de sedimentos; esto podría generar impactos negativos en los macro-invertebrados y la flora acuática del Río en la parte alta de la cuenca.

Las implicancias de las alteraciones analizadas en el presente estudio, en el ecosistema del Río Rímac necesitarían ser evaluadas in situ, debido a la particularidad de cada ecosistema; sin embargo, en términos generales la respuesta de la biodiversidad sería similar a la de otras zonas, las cuales se vienen estudiando en los últimos años. En este sentido, algunas de las implicancias ecosistémicas podrían incluir:

- Peces y moluscos de agua dulce responden negativamente a las alteraciones en los caudales, independientemente de su mecanismo de respuesta (Ashton, 2012).
- En cursos de agua con reducción de caudales máximos, los nadadores activos son sustituidos por especies de peces bentónicos y aerodinámicos, mientras que los macroinvertebrados, con la habilidad de abandonar temporalmente el medio acuático o moverse rápido dentro de este sustituirán a las especies que carecen de estos rasgos (Carlisle et al., 2010)
- Las corrientes lentas que albergan macroinvertebrados que prefieren substratos finos, sustituirán a los rápidos de flujos turbulentos que albergan macroinvertebrados que prefieren substratos gruesos (Carlisle et al., 2010).

Asimismo, es importante tener en cuenta que, la magnitud de la respuesta biológica típicamente refleja la magnitud de la alteración de los caudales, sin embargo, algunos organismos se extinguen independientemente del nivel de la alteración (Ashton, 2012).

Se podría inferir que las alteraciones hidrológicas sumadas a las alteraciones de la calidad de las aguas del Río Rímac por los residuos industriales y domésticos son los causantes de las condiciones de degradación que sufre el ecosistema del Río.

A pesar de lo anterior, algunas de las implicancias positivas del cambio en el régimen de los caudales incluye: la disminución de la probabilidad de inundaciones debido a eventos máximos extremos, como el sucedido el tres (03) de marzo de 1994, fecha en la que se desbordaron las aguas del Río Rímac dejando damnificadas a 10,754 personas (La Red 1994); el incremento de los caudales en la temporada seca beneficiaría la dotación de agua para consumo humano y riego en la cuenca, en particular a la Ciudad de Lima.

V. CONCLUSIONES

Mediante el presente estudio de la cuenca alta del Río Rímac, se caracterizó la variabilidad interanual de los caudales mediante el método de Ecoflujo y se cuantificaron las alteraciones hidrológicas con los IAH, además de analizar la correspondencia de los cambios en el caudal con la variabilidad de la precipitación en la zona de estudio; esto fue posible gracias a la disponibilidad de información diaria de caudales de un largo periodo (93 años).

Los resultados mostraron las características y magnitud de las alteraciones en el régimen de los caudales a partir de los años 60s y su correspondencia con las precipitaciones, teniendo como principales hallazgos los siguientes:

- Es evidente la variación en la estacionalidad de los caudales mensuales del periodo alterado, con respecto al periodo natural, con incremento en los caudales en la temporada seca y reducción de los mismos en la temporada húmeda y con una significativa tendencia negativa (positiva) para los caudales máximos (mínimos), en todo el periodo de análisis.
- A nivel inter-anual, en base al análisis del Ecoflujo, se deduce un fuerte incremento de los caudales en el periodo alterado, que se evidencia por el incremento de los Ecosuperávits y reducción de los Ecodéficits, con mayor énfasis a partir de los años 90s. Asimismo, es evidente que, predomina una reducción de los caudales (Ecodéficit) en el periodo lluvioso (DEF, MAM), fuertemente relacionado con anomalías negativas de precipitación y un claro incremento de los caudales (Ecosuperávit) en el periodo seco (JJA, SON), que no guardan correspondencia con las variaciones en la precipitación, pues es producto de los proyectos de regulación y trasvase implementados en la zona de estudio.
- De la cuantificación de la alteración en el régimen de los caudales mediante los IAH, se tiene que, las variaciones en los caudales en los meses secos fue de un 55% en promedio, mientras que en los meses lluviosos (Enero-Abril) fue de -10% en promedio, asimismo, los caudales bajos variaron en un 36%, con menor duración y frecuencia, y, los caudales altos en un -26%, con mayor frecuencia pero menor duración.
- Los cambios analizados en el régimen de los caudales del Río Rímac tendrían impactos positivos en la reducción de peligros de inundaciones y la mejora en la cobertura de las demandas de agua, para consumo humano y riego principalmente; sin embargo, también generarían impactos negativos en el equilibrio del ecosistema del Río.
- En suma, el método de Ecoflujo y los IAH son complementarios y facilitan el análisis profundo de los cambios en el régimen de los caudales del Río Rímac en términos cualitativos y cuantitativos, teniendo como ventaja el Ecoflujo la posibilidad de mostrar la relación con otras variables como la precipitación.

VI. BIBLIOGRAFÍA

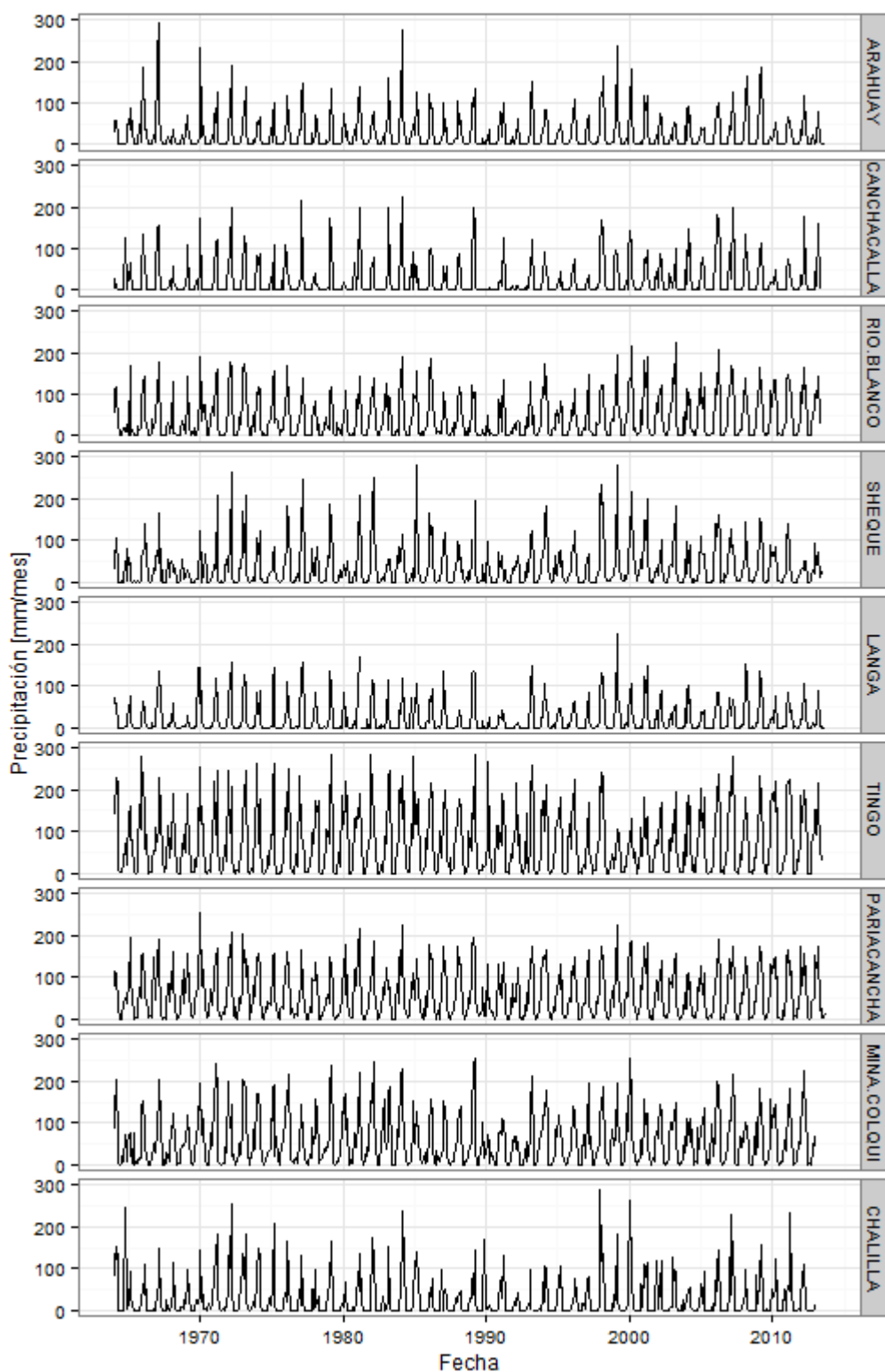
- ANA, U.D.G.Y.R.H., 2012. *Inventario de glaciares de las cordilleras la viuda / central / chonta / huaytapallana / huagoruncho*, Huaraz.
- Arnell, N.W., 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe : a continental perspective. *Elsevier*, 9.
- Ashton, M.J. 2012. Ecological responses to flow alteration: A literature review within the context of the Maryland Hydroecological Integrity Assessment. Maryland. Department of Natural Resources, Monitoring and Non-Tidal Assessment Division. RAS-MANTA-AIM-13-01, 45 p.
- BUNN, S.E. & ARTHINGTON, A.H., 2002. Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. *Environmental Management*, 30(4), pp.492–507. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-002-2737-0>.
- Carlisle, D., Wolock, D., Meador, M., 2013. *Frontiers in Ecology and the Environment. Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment*. Available at: <http://www.frontiersinecology.org> [Accessed November 03, 2014].
- Gao, B. et al., 2012. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology*, 448-449, pp.30–38. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169412003642> [Accessed September 8, 2014].
- Gao, Y. et al., 2009. Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), pp.136–147. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409003321> [Accessed November 03, 2014].
- INEI, 2014. *Estado de la Población Peruana 2014*, Lima, Perú.
- Kim, B.-S., Kim, B.-K. & Kwon, H.-H., 2011. Assessment of the impact of climate change on the flow regime of the Han River basin using indicators of hydrologic alteration. *Hydrological Processes*, 25(5), pp.691–704. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.7856> [Accessed September 3, 2014].
- Labat, D. et al., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, 27(6), pp.631–642. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170804000478> [Accessed August 12, 2014].
- Mathews, R. & Richter D., B., 2007. Application of the Indicators of Hydrologic Alteration Software in Environmental Flow Setting. *Journal of The American Water Resources Association*, 0(0).
- Mcmanamay, R.A., 2014. Quantifying and generalizing hydrologic responses to dam regulation using a statistical modeling approach. *Journal of Hydrology*, 519, pp.1278–1296.
- Mittal, N. et al., 2014. Flow regime alteration due to anthropogenic and climatic changes in the Kangsabati River, India. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(3), pp.182–191. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1642359314000512> [Accessed November 18, 2014].
- Poff, N.L. et al., 2007. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (14), pp.5732–5737. Available at: <http://www.pnas.org/content/104/14/5732.abstract>.
- Pyron, M. & Neumann, K., 2008. Hydrologic alterations in the Wabash River watershed, USA. *River Research and Applications*, 24(8), pp.1175–1184. Available at: <http://dx.doi.org/10.1002/rra.1155>.
- La Red, 1994. Desastres y sociedad. *Diciembre 1994*, (3), p.96.
- Richter, B.D. et al., 1996. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), pp.1163–1174.
- Suarez, W., Condom, T. & Apaéstegui, J., 2010. Determinación de los impactos del cambio climático sobre la hidrología de las cuencas del Rímac y Mantaro (Perú). *CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO MANTARO*, p.260.
- The Nature Conservancy, 2009. Indicators of Hydrologic Alteration Indicators of Hydrologic Alteration. , (April).
- Vogel, R.M. et al., 2007. Relations among storage, yield, and instream flow. *Water Resources Research*, 43(5), p.n/a–n/a. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2006WR005226> [Accessed September 10, 2014].
- Ware, C., Knight, W. & Wells, D., 1991. Memory Intensive Algorithms for Multibeam Bathymetric Data. *Geosci*, 17(7), pp.985–993.
- World Resources Institute, 2005. *Los Ecosistemas y el Bienestar Humano : Humedales y Agua*, Washington, DC.
- WWF Perú, 2014. *Un frágil ciclo - Agua, Energía y Población en Lima*, Lima, Perú.

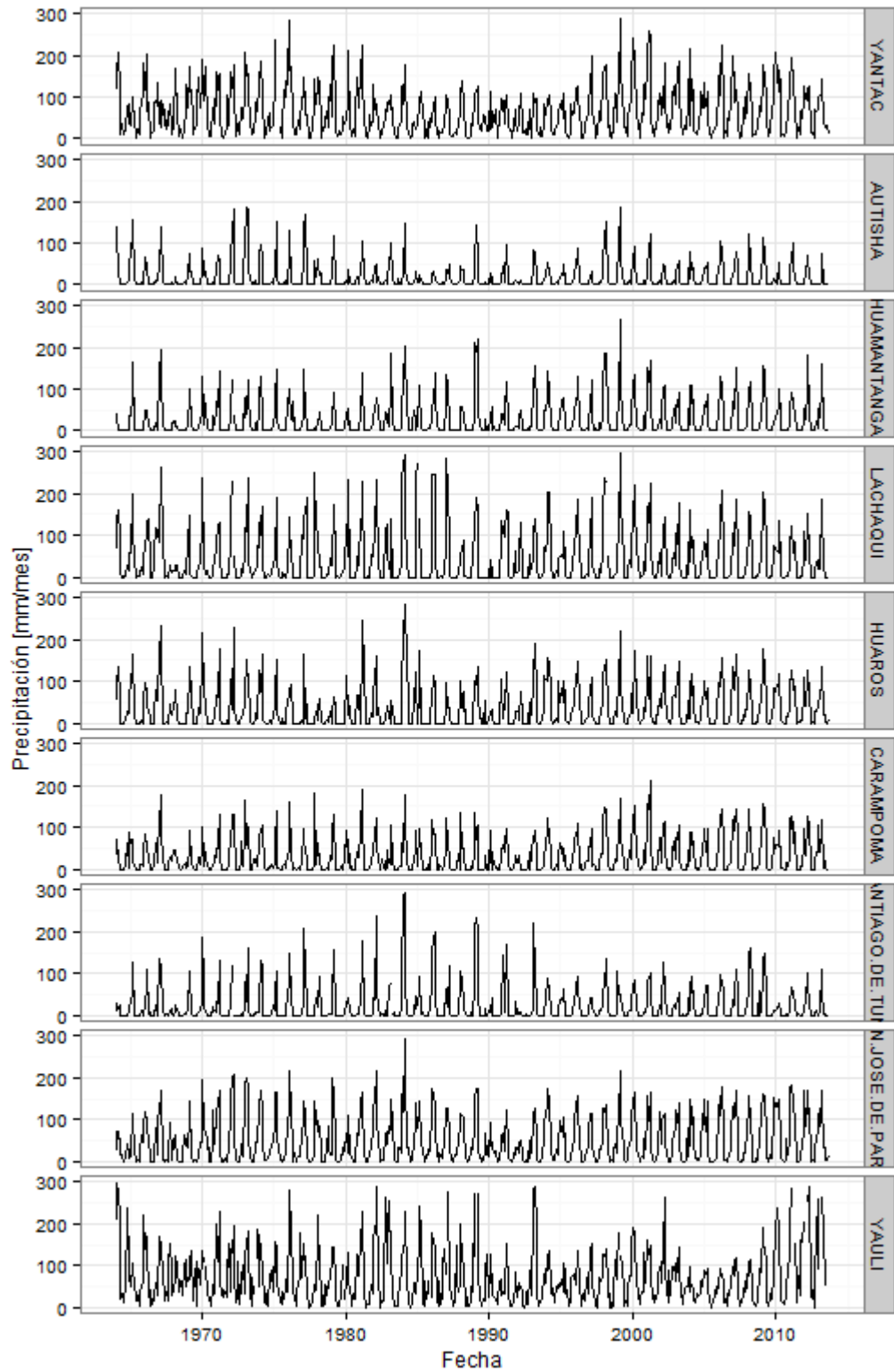
ANEXO

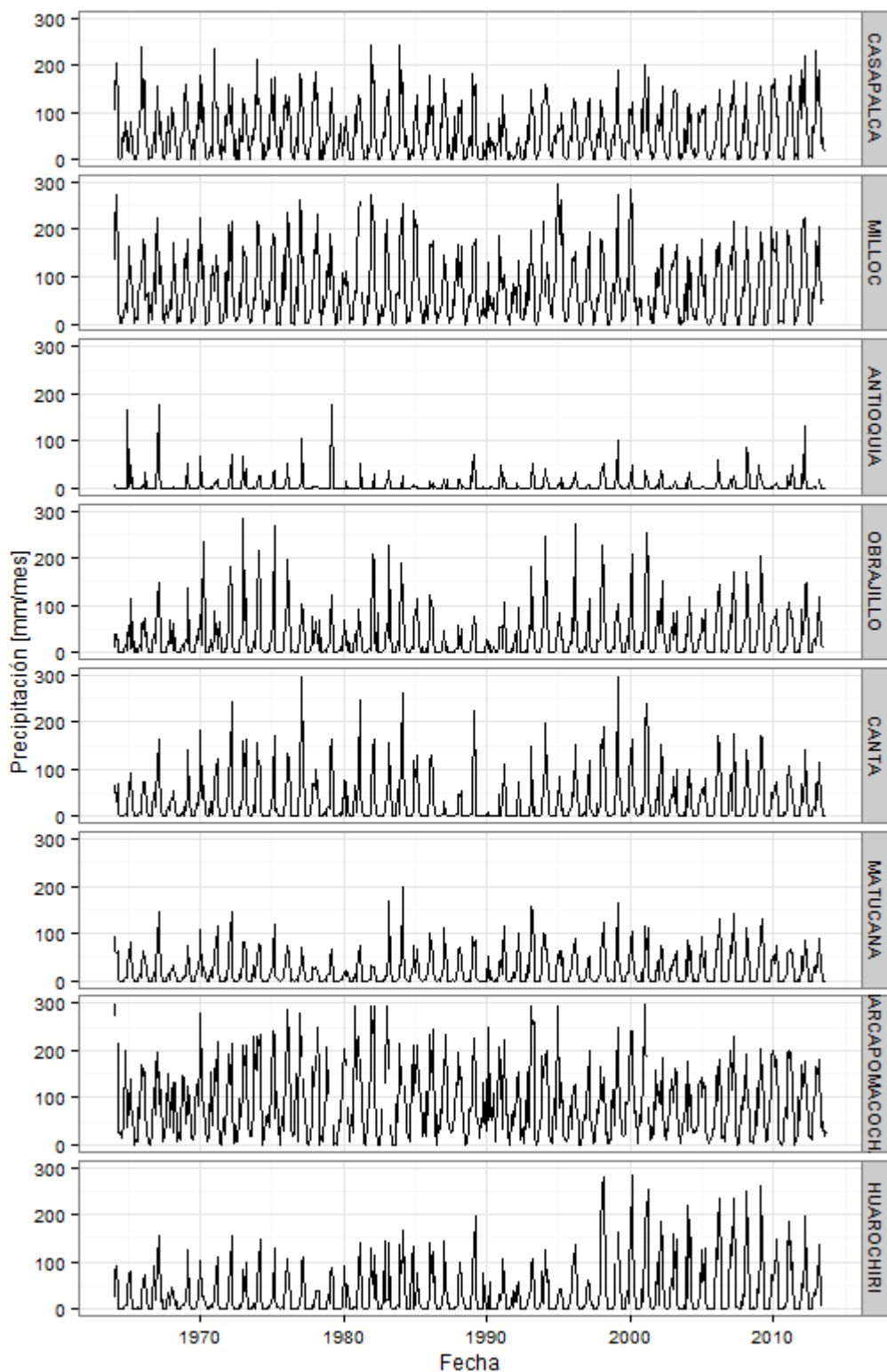
ANEXO 1: Serie anual de precipitación areal para la zona de estudio (1964-2012)

Año	Precip. Areal
1964	374.4
1965	481.2
1966	586
1967	301.5
1968	378.2
1969	533.9
1970	541.1
1971	632.1
1972	637.4
1973	572.9
1974	477
1975	531.5
1976	461.3
1977	432
1978	446.4
1979	321.2
1980	591.8
1981	573.2
1982	491.3
1983	686.3
1984	533.8
1985	549.1
1986	410.1
1987	448.4
1988	594
1989	235.2
1990	426
1991	232.6
1992	496.3
1993	600.4
1994	420.8
1995	487.8
1996	318.6
1997	657.7
1998	579.1
1999	622.2
2000	670.8
2001	482.8
2002	507.7
2003	411.9
2004	466.6
2005	582.5
2006	597.2
2007	475.9
2008	606.6
2009	560
2010	595
2011	619.6
2012	584.6

ANEXO 2: Series de precipitaciones promedio mensuales de las estaciones del estudio







ANEXO 3: Variaciones en las series de caudal mensual entre el periodo natural y alterado

