Evaluación espacio-temporal del déficit hídrico para las cuencas de Chile a partir de información satelital.

Autores:

Mauricio Galleguillos
Mauricio Zambrano
Cristóbal Puelma
Alberto Jopia

Tabla de contenido

Resumen 4
Introducción 5
Objetivo General 7
Objetivos específicos 7
Materiales y Métodos 8
Área de estudio 8
Descripción de los productos satelitales 8
Evapotranspiración 8
Precipitación 9
Procesamiento 10
Evaluación temporal de las variables hidrológicas 12
SPEI: Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index 13
Evaluación de los productos satelitales 13
Comparación del estado de déficit hídrico de las cuencas de Chile 14
Análisis hidrológico por cobertura de suelo 14
Resultados y Discusión 15
Evaluación general de las cuencas de Chile 15
Análisis regional del déficit hídrico 21
Región de Arica-Parinacota 21
Región de Tarapacá 28
Región de Antofagasta 35
Región de Atacama 42
Región de Coquimbo 49
Región de Valparaíso 56
Región Metropolitana 63
Región de O'Higgins 70
Región del Maule 77
Región del Biobío 84
Región de Araucanía 91
Región de los Ríos 98
Región de los Lagos 105
Región de Aysén 112

Región de Magallanes 119
Análisis del déficit hídrico por cobertura de suelos 125
Análisis del déficit hídrico por cobertura de suelos 128
Conclusiones 131
Perspectivas 132
Referencias 133

Resumen

Durante los últimos años, Chile ha manifestado una creciente preocupación por los recursos hídricos debido a la preocupante condición de mega-sequía que existe desde hace al menos 6 años, lo que ha agravado los problemas de gestión del recurso, que ya era de cuidado antes de la sequía, en muchas zonas del país. El presente estudio aborda una evaluación espacio-temporal del déficit hídrico en las principales cuencas del país a partir de información satelital. Se consideró el índice estandarizado de precipitación evapotranspiración (SPEI), el cual fue calculado para el periodo 2000-2014 a partir de los productos satelitales CHIRPS V2 y MOD16 para la precipitación (Pp) y evapotranspiración (ET) respectivamente. Dentro de la metodología se incluyó una validación de ambas variables satelitales a partir de mediciones de estaciones meteorológicas. Esta validación mostró resultados favorables de los productos satelitales para casi todas las regiones del país, con algunas incertezas en la zona desértica para los productos de Pp y en las zonas costeras para los productos de ET. Los resultados muestran un patrón diverso de acuerdo a la macro-zona geográfica presentándose una condición de superávit a neutro en el periodo de estudio para la mayoría de las cuencas de la zona altiplánica y austral. El resto del país se encuentra en una situación de déficit hídrico generalizado. La zona desde Copiapó a los Vilos presenta el déficit hídrico más grande en magnitud, dado posiblemente por una condición de déficit estructural de ese territorio acostumbrado a sequias prolongadas. De los Vilos hasta Aysén se registra una extensa sequía destacándose algunas cuencas de las regiones del Maule, Biobío, Araucanía y los Ríos. Los resultados del déficit analizado desde la perspectiva del consumo hídrico evaluado a través de la ET real, nos indican que las cuencas de la zona entre Copiapó y O'Higgins no manifiestan un déficit hídrico real, aludiendo posiblemente al abundante uso de agricultura de riego en las cuencas lo que involucra otras fuentes de recursos hídricos además de la Pp directa. El resto del país presenta un patrón similar de déficit hídrico estimado por al potencial de la atmosfera (ET potencial) o por el consumo real (ET real), respondiendo estas cuencas principalmente a las precipitaciones y reservas del suelo. El análisis por uso de suelo se realizó en la cuenca del río Imperial y la cuenca del río Maule ya que estas presentan usos de suelos representativos de los actores del territorio. En general los resultados apuntan a un desecamiento de la vegetación nativa tanto de matorral así como de bosque nativo en ambas cuencas, siendo las plantaciones forestales coberturas que en general mantienen o aumentan su consumo de agua (ETR), pese al significativo déficit de Pp. Esta respuesta es notablemente notoria para la zona del Maule. Con respecto a la agricultura esta presenta una respuesta variable con tendencias cercanas a 0. Estos resultados explicitan con detalle espacial y temporal el problema de déficit hídrico que vive el país, sirviendo de base para un diagnóstico de la situación de los recursos hídricos de Chile.

Introducción

Chile es un país fuertemente afectado por sequías las cuales se han acentuado en los últimos años, generando efectos adversos en las reservas de nieve, en los caudales de los principales cursos de agua y por ende en la vegetación nativa a través de mecanismos conocidos como propagación de la sequía (Garreaud et al., 2017). Este fenómeno genera incertezas respecto a la disponibilidad de los recursos hídricos en el futuro sobre todo en un contexto de cambio climático donde estos fenómenos se harán más intensos y recurrentes (Boisier et al. 2016). Los recursos hídricos representan un eje de desarrollo fundamental para la mayoría de los actores productivos del país, así como para el consumo humano. Entre los actores productivos de mayor demanda se destacan la minería, las forestales y la agricultura, siendo esta última la de mayor demanda. La presente propuesta apunta a generar una base de datos de variables hidrológicas espacialmente explicitas que permitan identificar las tendencias y anomalías del déficit hídrico de los últimos 15 años en las cuencas de todo el país. Como variables claves se identifican la pluviometría y evapotranspiración, considerando tanto la potencial y la real, variables que representan la principal entrada y salidas del balance hidrológico en escalas de tiempo breves y se considerarán productos satelitales como base para realizar el estudio. La pluviometría es la variable fundamental que controla el funcionamiento de ecosistemas en particular aquellos limitados por agua los cuales se definen por tener una precipitación efectiva agronómica que satisface el 75% de la demanda atmosférica (Guswa et al. 2004). Estos corresponden a la gran mayoría del país, desde la frontera con Perú hasta el paralelo 38 aproximadamente, y en la zona austral de Magallanes, aunque la zona sur puede presentar este comportamiento en periodos de verano particularmente bajo condiciones de escasez hídrica. La evapotranspiración potencial (ETP) depende únicamente del poder evaporante de la atmósfera, el cual es controlado por variables meteorológicas tales como la radiación, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento mientras que la evapotranspiración real (ETR) representa la cantidad de agua que es efectivamente transpirada y evaporada desde la superficie hacia la atmósfera. La evapotranspiración real nos entrega información sobre la capacidad de la superficie de transformar el agua líquida en vapor, proceso también denominado como calor latente. En este sentido la ETR o calor latente de vaporización (LE) es una resultante del balance de energía de superficie, el cual depende de la radiación neta (*Rn*), el calor sensible (*H*), el calor de conducción del suelo (G) (Ecuación 1).

$$Rn = G + H + LE(ETR) \qquad Ecuación\ 1$$

La ETR es entonces una variable del estado de los ecosistemas que está definida no solo por las condiciones de la atmósfera sino que además por la capacidad de los ecosistemas de transformar agua líquida en vapor lo que se asocia a la fisiología y fenología de plantas y sobre todo a la humedad del suelo disponible por las raíces de las plantas (o humedad aprovechable) lo que tiene implicancias hidrológicas bien definidas (Chapin III, 2012). La relación entre la ETR y la ETP se define en este estudio como Kc, y se calcula como el cociente entre ETR y ETP, siendo un símil del concepto propuesto por FAO para definir el consumo de agua de los cultivos mediante su término de coeficiente de cultivo. De forma practica la ETP nos dice cuál es la capacidad que tiene la atmósfera de demandar agua de superficies con vegetación, siendo una variable que depende únicamente de las condiciones micro-climáticas, mientras que la ETR representa el uso efectivo de agua por parte de superficies con vegetación y depende de la ETP, así como también de la capacidad de la vegetación de utilizar el agua que posee y que esta almacenada en el suelo

principalmente. La ETP y la ETR tienen valores similares cuando existe suficiente agua en el suelo ya que las plantas puedan transpirar libremente de acuerdo a la demanda potencial de la atmósfera definida por la ETP. Por el contrario cuando no existe suficiente agua en el suelo, la ETR tiende a cero debido a que las plantas no son capaces de transpirar, aunque exista una demanda potencial elevada dado por un elevado valor de ETP.

Para evaluar el comportamiento de estas variables en forma conjunta y analizar la sequía, se utilizará el índice estandarizado de precipitación evapotranspiración, SPEI, desarrollado por Vicente-Serrano et al. (2010). Este índice permite integrar los efectos de la precipitación, que es la variable que presenta mayor variabilidad, así como la evapotranspiración cuyo efecto y variabilidad temporal se ha visto incrementado producto del aumento de la temperatura del aire debido al calentamiento climático (Vicente-Serrano et al. 2010b). Por otra parte SPEI es un índice multi-escalar de sequía basado en datos climatológicos que permite obtener el inicio, la duración y magnitud de las condiciones de sequía con respecto a las condiciones normales. A partir del SPEI se podrán determinar la magnitud de los eventos de sequías acumulados durante el periodo de estudio para cada cuenca, lo que permitirá clasificar las cuencas de acuerdo a la magnitud de SPEI.

El presente estudio analiza la expresión espacio-temporal del déficit hídrico para prácticamente todo el país a partir de información satelital. Esta consiste en datos de precipitación y evapotranspiración potencial mensual en mm/mes, la cual incluye un proceso de validación de los productos considerando las estaciones meteorológicas disponibles en el explorador climático del CR^2. Una de las limitantes del estudio es el periodo considerado que solo abarca 15 años (2000-2014) ya que las imágenes no están disponibles desde antes. De acuerdo a la teoría, esto es insuficiente desde el punto de vista climático, no obstante cabe señalar que el periodo escogido presenta una importante variabilidad de lluvia y de temperatura donde se reconoce un periodo normal y otro de sequía importante conocido como mega-sequía que comienza cerca del año 2010 y que perdura al menos hasta el año 2016 afectando a gran parte del país (Garreaud et al. 2017). Esto permite evaluar la respuesta de las cuencas en contextos hidrometeorológicos contrastante para casi todo el país a través del índice de déficit hídrico. En este sentido se debe mencionar que la validez de los resultados será mayor en cuencas que presenten mayor ajuste en sus métricas de validación de los productos satelitales y en zonas donde se hayan presentado condiciones de precipitación y temperatura variables en el tiempo de estudio con respecto a la variabilidad histórica.

Objetivo General

Evaluar el déficit hídrico a escala de cuenca, a través del uso de productos satelitales.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las condiciones hídricas de pluviometría y evapotranspiración real y potencial de las cuencas de Chile a partir de información satelital.

2. Evaluar la pertinencia de las estimaciones satelitales a través de una comparación con datos *in-situ*.

3. Analizar las tendencias y anomalías de la precipitación y la evapotranspiración.

4. Estimar un índice de déficit hídrico a escala mensual, estacional y anual basado en observaciones satelitales para el periodo 2000-2014.

5. Analizar el comportamiento de las variables hidrológicas y los indicadores de déficit hídrico en una cuenca afectada por sequía, considerando sus coberturas de suelo.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio abarca 67 cuencas distribuidas a lo largo de Chile, hasta el paralelo 46º S. donde se evaluaron aquellas cuencas mayores a 100 km^2, de acuerdo a la pertinencia espacial que tiene la resolución de los productos satelitales. Cabe señalar que algunas cuencas en particular aquellas de la zona norte, no fueron consideradas pese a tener una superficie importante debido a la falta de datos de los productos satelitales al encontrarse en zonas desérticas con escasas lluvias y sin vegetación.

Al sur de la latitud 46º solo se evaluó de forma parcial el déficit de acuerdo a los datos disponibles. Para definir su extensión se utilizó la última actualización (octubre 2016) de la capa vectorial proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA) para estudios vinculados a la institución la cual posee 115 cuencas cuya delimitación ha sido actualizada.

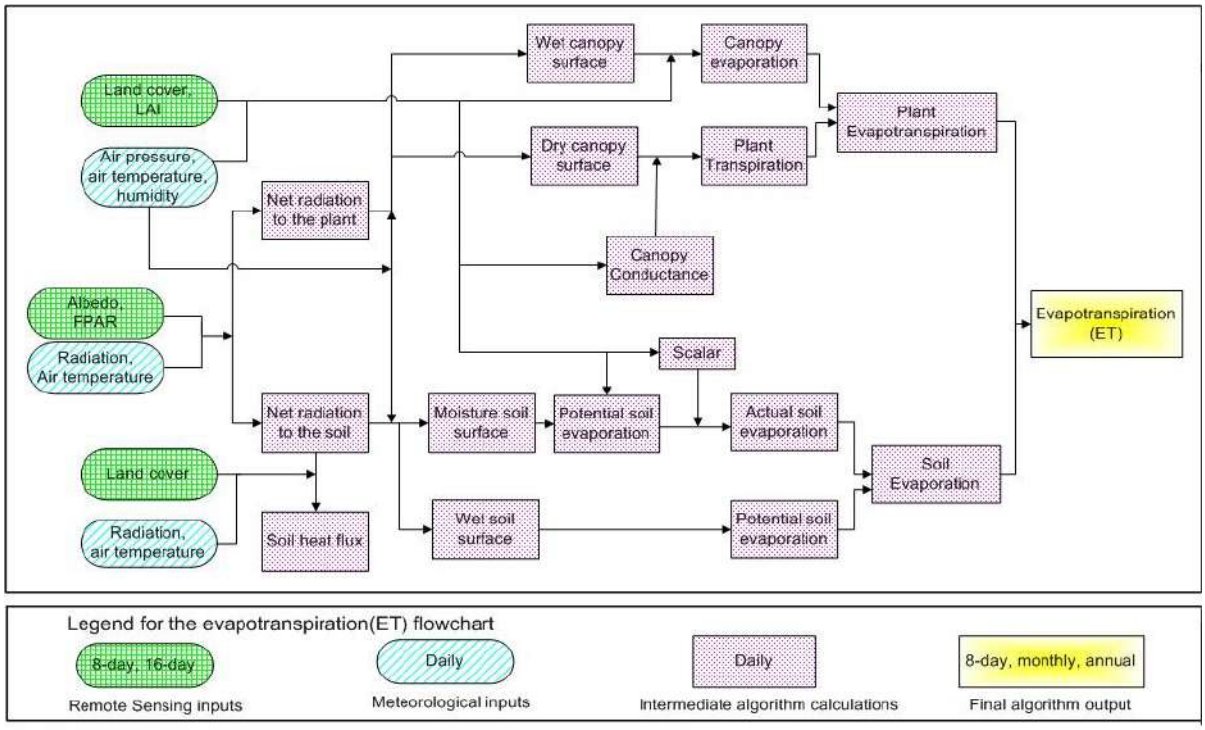
En una etapa final, se seleccionaron las cuencas del rio Imperial y Maule por estar fuertemente afectada por déficit hídrico, esta se describe en detalle en los resultados.

Descripción de los productos satelitales

La evaluación del déficit hídrico fue realizada mediante la utilización de productos satelitales MODIS y CHIRPS para evapotranspiración y precipitación, respectivamente.

Evapotranspiración

Se utilizaron los productos MOD16 de Evapotranspiración Potencial (ETP) y Evapotranspiración Real (ETR) a una resolución espacial de 1km (es decir, 1km^2) y a una resolución temporal mensual (Hall et al. 2002). Para el cálculo de la evapotranspiración el producto MOD16 se basa en el algoritmo mejorado de Mu et al. 2011, el cual se basa en la resolución en una forma linear de la ecuación de Penman-Monteith (Mu et al., 2011). La evapotranspiración de la vegetación y del suelo se calcula de forma separada utilizando el producto MOD15A2 de la fracción fotosintéticamente activa (fPAR) como un proxy de la fracción de cobertura de la vegetación. La radiación neta es calculada a partir de la resolución del balance de energía de superficie utilizando la información de radiación de onda corta provista por la “Data Assimilation Office” (DAO), el producto MSCD43B3 de albedo y los datos de temperatura del aire y de superficie provenientes de la DAO. La conductancia de la superficie se asume lineal de acuerdo a la relación que existe con el Índice de Área Foliar o “Leaf Area Index” (LAI) y se establece una corrección por los escalares de temperatura y estrés hídrico (Figura 2).



Flowchart showing the logic of the MODIS ET algorithm for calculating daily ET (Mu et al., 2011).

Figura 1. Diagrama metodológico de la estimación de evapotranspiración a partir del producto MOD16.

Precipitación

La precipitación mensual fue obtenida con una resolución espacial de 0.05°x0.05° (i.e., ~25 km2 cerca del ecuador). El Grupo de Riesgos Climáticos de Precipitaciones Infrarojas con datos de estaciones (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data, CHIRPS) ha desarrollado un producto de precipitaciones global conocido como CHIRPS v2.0, disponible en escalas temporales diarias, pentadales y mensuales; explícitamente diseñado para el monitoreo de la sequía agrícola y el cambio global sobre la tierra (Funk et al., 2015). CHIRPS v2.0 combina datos de precipitación obtenidos desde satélites geosincrónicos y de órbita polar, desde cinco productos diferentes (como el Climate Prediction Center MORPHing Technique, CMORPH, y la Tropical Rainfall Measurement Mission, TRMM), con datos registrados en más de 2000 pluviómetros, para calibrar las estimaciones de duración de nubes frías (Cold Cloud Duration, CCD) (Funk et al., 2015). Este producto tiene una resolución espacial de 0.05° entre los 50°N hasta los 50°S (para todas las longitudes) con más de 30 años de datos de precipitación (1981-2016). Los datos casi en tiempo real provenientes del Sistema de Telecomunicaciones Global (GTS) de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) se utilizan continuamente para actualizar (aproximadamente cada dos días) y validar las estimaciones de los sensores remotos utilizando información adicional (emisiones de energía de la Tierra, tanto fisiográficas como teledetectadas) utilizando una regresión geoestadística (Funk et al., 2015). De manera sintética, el proceso de generación de datos CHIRPS comprende tres etapas principales: i) la obtención de la climatología desde el Climate Hazards group Precipitation (CHPclim Funk et al., 2015), ii) la obtención de las estimaciones de origen solamente satelital desde el Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) y, iii) el procedimiento de calibración

utilizando estaciones. A pesar de que el desarrollo continuo de CHIRPS está principalmente dedicado a asuntos relativos a la sequía en África, recientemente han aparecido otras aplicaciones globales y también artículos científicos que han estudiado la dinámica del clima en América del Sur (Ceccherini et al., 2015; Deblauwe et al., 2016). Una descripción detallada del producto CHIRPS v2.0 se encuentra en Funk et al. (2015).

Ambos productos satelitales fueron recuperados a escala mensual para el periodo 2000/01/01 hasta 2014/12/31, obteniéndose un total de 180 escenas para MOD16 y para CHIRPS abarcando un periodo de 15 años.

Procesamiento

Para efectuar una homogeneización de escala y proyección entre los productos, se definió una resolución espacial de 1km y una proyección geográfica en el Datum WGS 1984.

Los productos MOD16 se encuentran a una resolución espacial de 980 m, por lo tanto para ajustarlo a la resolución escogida de 1 km se realizó un *re-muestreo* a través del método de interpolación "vecino más cercano" ("nn" por sus siglas en inglés "*nearest neighbor")*. En el caso de la Evapotranspiración, al ser una variable que depende del uso de suelo, es importante utilizar un método de interpolación que no agregue ni promedie el valor a interpolar, por lo tanto el método escogido asigna a la nueva grilla el valor de la celda más cercana, sin alterar el valor de estas, como se muestra en la Figura 3, en el cual se pasa de la posición 1 a la posición 2 interpolando los píxeles de la imagen por el método descrito. Los errores generados se representan en la Figura 4 tanto para ETR como para ETP, los cuales se calcularon en base a la diferencia entre la suma del producto original y la suma del disgregado para cada imagen.

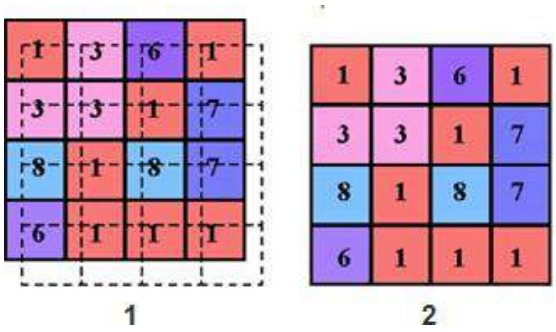


Figura 2. Método de interpolación "vecino más cercano".

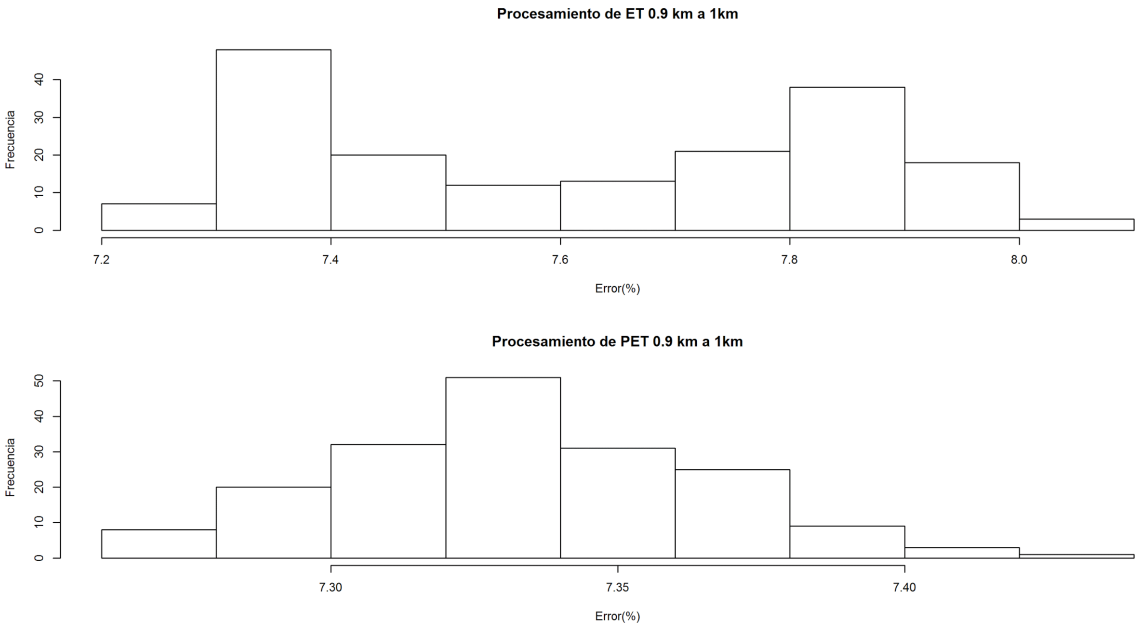


Figura 3. Errores generados en el método de interpolación de MOD16.

En general los errores generados por el método de re-muestreo son menores al 8% lo que permite asegurar que el procedimiento fue exitoso para la ETP y la ETR.

Por otro lado, los productos de precipitación (CHIRPS v2.0) con una resolución de 5 km fueron desagregados a 1 km sin alterar la magnitud de los valores. A pesar de que no se recomienda aumentar la resolución de la información cartográfica sin un modelo, en este caso se efectuó basándose en el supuesto de que en la superficie de cada pixel precipita la misma cantidad de agua, es decir el píxel es homogéneo, y por ende la magnitud no se ve afectada por la división de superficie. Se consideró esta metodología bajo el supuesto de que la precipitación no presenta grandes variaciones a escala de 5 km, por lo que se asume que su distribución en esta área es homogénea. Los errores generados se representan en la Figura 5, los cuales se calcularon en base a la diferencia mensual entre el producto original y el disgregado. Estos presentan un grado de error inferior al 3 % lo que demuestra la aplicabilidad del método.

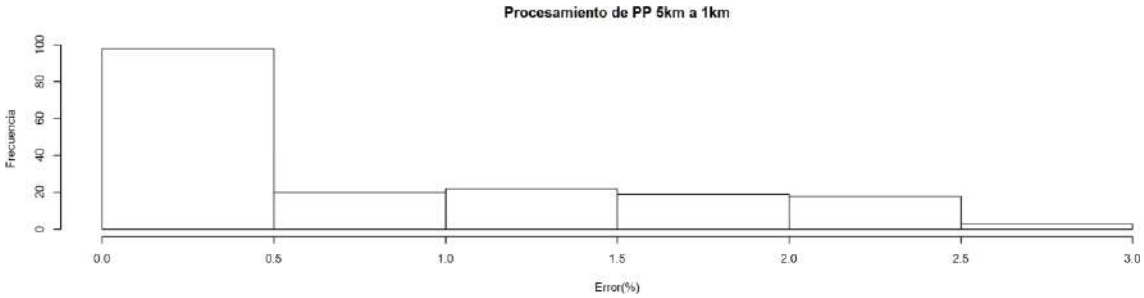


Figura 4. Errores generados en la desagregación de CHIRPS.

A continuación se realizó un ajuste de la grilla de los pixeles de CHIRPS, utilizando la posición de los productos MOD16 como referencia, ya que este producto depende de la cobertura de la superficie y un desplazamiento de los pixeles provocaría mayor error que el desplazamiento de la precipitación, la cual es una variable continua en el espacio y depende principalmente a procesos atmosféricos.

Cabe señalar que a partir de los productos ETP y ETR se calculó un valor de coeficiente de cultivo real (Kc) el cual permite evaluar la cantidad de agua evapotranspirada con respecto a lo que podría evapotranspirar en condiciones ideales (Ecuación 1).

$$Kc = \frac{ETR}{ETP} \qquad (Ecuación\ 1)$$

Evaluación temporal de las variables hidrológicas

Las tendencias de Precipitación, ETR y ETP, fueron obtenidas para una temporalidad mensual, estacional y anual. La escala estacional fue generada mediante la adición de las imágenes que componen los meses de Verano (Diciembre-Enero-Febrero), Otoño (Marzo-Abril-Mayo), Invierno (Junio-Julio-Agosto) y Primavera (Septiembre-Octubre-Noviembre), y la anual mediante la suma de los meses que componen cada año.

Para la escala mensual y estacional las tendencias temporales de cada variable fueron analizadas mediante la mediana para cada mes, en todo el periodo de tiempo, evidenciando su variabilidad en el espacio a través de los percentiles 25 y 75 del conjunto de pixeles dentro de la cuenca. Para visualizar las diferencias en el tiempo en el caso de la escala anual, se presenta una serie temporal de boxplots que representan los cuartiles y el valor de la mediana de los valores de la cuenca para cada una de las variables de análisis.

Por otro lado, se calcularon las anomalías sobre el comportamiento del periodo de estudio (2000 - 2014), es decir, la diferencia entre un mes seleccionado (estación o año), por ejemplo: julio 2012, y la media total de los meses de julio del periodo de estudio.

$$Ai = xi - X \qquad Ecuación\ 2$$

Donde *Ai* corresponde a la anomalía del mes *i, X* es el valor promedio de la variable analizada de los meses *i* del periodo 2000-2014 y *xi* es el valor de la variable analizada para el mes *i*. Las anomalías fueron calculadas sobre los meses y estaciones. Del mismo modo que la propuesta anterior, las tendencias fueron evaluadas a través de la mediana para cada fecha y sus respectivos cuartiles.

Para la evaluación de la tendencia de cada variable se utilizará el método no paramétrico de Mann-Kendall, el cual es un test usado comúnmente en series de tiempo de datos ambientales, climáticos e hidrológicos. Al realizar el test, se obtiene el estadístico (S), si este es positivo se infiere que la tendencia de la serie es creciente, mientras que si S es negativo hay una tendencia decreciente. Este método, a la vez proporciona un valor *p*

utilizado para evaluar la significancia del estadístico. El cálculo del estadístico S se ha realizado con paquete “Trend” (Pohlert, 2016) del software R.

SPEI: Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

El Índice de Precipitación Evaporación Estandarizado (SPEI), propuesto por Vicente-Serrano et al. (2010), corresponde a un índice meteorológico que incluye la diferencia entre datos de precipitación (*Pi*) y evaporación potencial (*ETPi*) en una escala de tiempo determinada (i) (Ecuación 2).

$$SPEI\ (Deficit_Hidrico) = Pi\ - PETi \qquad (Ecuación\ 3)$$

Luego, los datos de Déficit hídrico son ajustados usando una distribución de Peason III y estandarizados utilizando “inverse normal function”, para obtener el índice SPEI lo cual es explicado en detalle en Vicente-Serrano et al. (2010).

Para efectos de este estudio, se calculará el SPEI, en base a la ETP. Por otro lado, el índice SPEI puede ser calculado a diferentes escalas temporales, es decir, es posible incorporar la influencia de valores pasados de la variable, permitiendo al índice adaptarse a la memoria del sistema en estudio. Por ejemplo, un valor de escala temporal igual a 3 implicaría que los datos del mes actual y de los últimos dos meses se utilizarán para calcular el valor SPEI para un mes determinado, incluyendo de esta forma la influencia estacional sobre el déficit del mes actual. Para fines de este estudio se calcularon los valores de SPEI calculados de forma mensual sin incluir el efecto memoria, pero además se presentan el SPEI con efecto de memoria estacional (o sea influencia de 3 meses) y el efecto de memoria anual el cual considera 12 meses. Estos últimos resultados son los presentados en este informe.

Para interpretar el SPEI, los valores negativos representan periodos más secos que las condiciones normales, mientras que los valores positivos del SPEI corresponden a niveles de humedad mayores a los normales, Valores entre ϵ [-1,0] y ϵ [1 y 0] representan procesos de déficit o superávit ligero respectivamente y valores ϵ [-1,-2] y ϵ [1 y 2] representan procesos de déficit o superávit importantes. Valores menores a -2 representan un déficit extremo y valores mayores a 2 un superávit extremo.

Evaluación de los productos satelitales

Para poder concluir de forma efectiva sobre las estimaciones de déficit hídrico se procedió a comparar las estimaciones de precipitación y ETP satelitales contra información derivada de las estaciones meteorológicas disponibles para zona para de esta forma poder cuantificar la incerteza de las variables que construyen el índice SPEI. En general existen numerosas estaciones con datos de precipitación en la zona pero escasas estaciones que dispone de los instrumentos capaces de entregar una estimación de la ETP a partir del método de Penmann-Monteith. Es por esto que se decidió estimar la ETP a partir del método simplificado de Hargreaves el cual hace uso de la temperatura máxima y mínima únicamente para estimar la demanda atmosférica.

Para evaluar la consistencia entre ambos datos se procedió a reportar el coeficiente de correlación r lineal, y el valor del índice de eficiencia Kling-Gupta Efficiency index (KGE) (Gupta et al. 2009) el cual varía entre -1 y 1 siendo el valor 1 considerado como condición ideal y aquellos valores positivos mayores a 0.5 aquellos identificados para estimaciones suficientemente robustas.

Comparación del estado de déficit hídrico de las cuencas de Chile

Para poder comparar el estado del déficit entre las cuencas de Chile, se consideró el indicador de SPEI, el cual fue calculado considerando los últimos 12 meses previos al mes evaluado. Sobre esta serie temporal se determinó la magnitud del SPEI, a partir de la suma ponderada de la intensidad de los eventos (valor bruto del SPEI-12) y de la duración de estos (en meses). La magnitud fue calculada considerando 3 umbrales de acuerdo a la intensidad del evento. Los umbrales definidos fueron los siguientes: SPEI menores a -0.84 se considera sequía moderada, valores menores a -1.28 se considera sequía severa y valores inferiores a -1.65 sequias extremas (Agnew 2000). Cabe señalar que los eventos considerados en la clase de sequía moderada pueden incluir aquellos de severidad superior (severa y extrema), por ende se utilizó esta métrica para asignar un valor de escasez a cada cuenca.

Análisis del déficit hídrico por cobertura de suelo

Para el análisis de las variables hidrológicas e indicadores de déficit por cobertura de suelo se consideraron la cuenca del río Imperial y la cuenca del río Maule debido a que son cuencas grandes de gran interés para el desarrollo económico del país y a su condición diversa de coberturas y condición de déficit hídrico importante pese a su condición climática contrastante. Se utilizaron el producto de cobertura de suelos a 30 m de resolución disponible para todo Chile (Zhao et al. 2016), el cual se basa en las coberturas definidas por FAO (Di Gregorio, 2005). El producto describe clases de uso de suelos para el año 2014 y para el propósito de este estudio fue re-escalado a 1x1 km para coincidir con la resolución de los productos satelitales. Sobre cada cobertura se observaron las tendencias de las variables hidrológicas y de los indicadores de déficit.

Resultados y Discusión

Evaluación general de las cuencas de Chile

SPEI

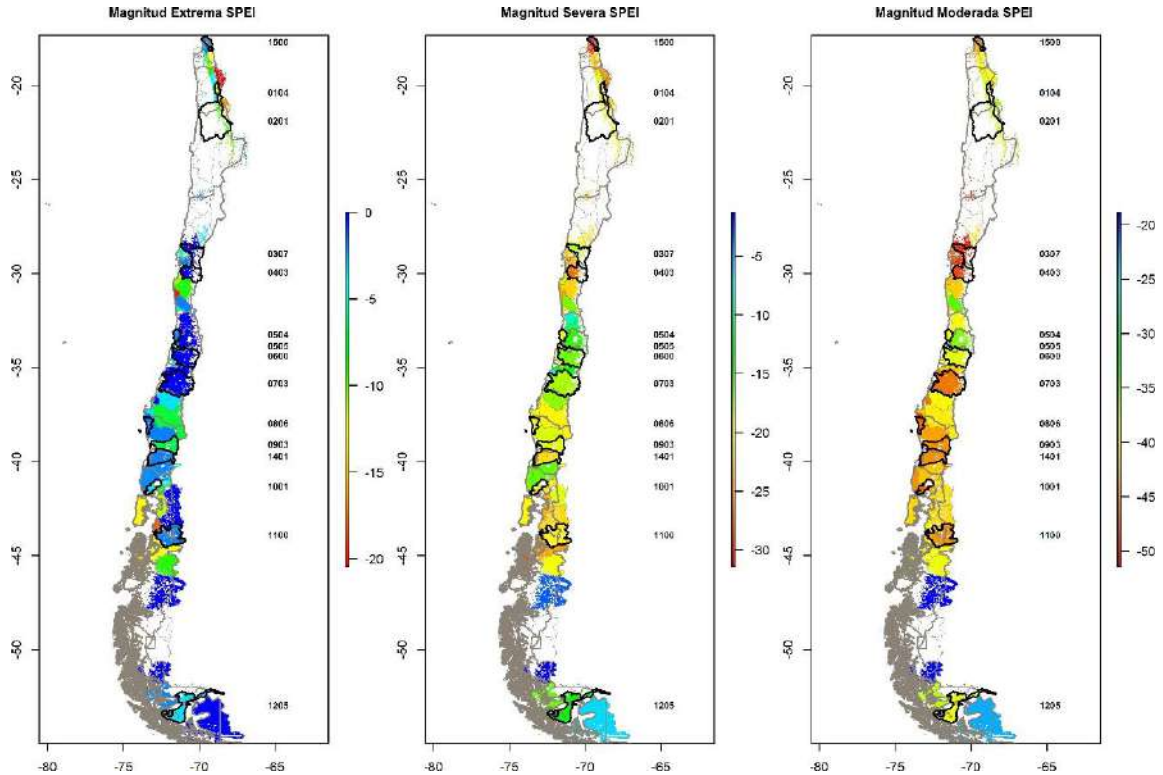


Figura 5: Magnitud del déficit hídrico obtenido a partir de la serie temporal 2000-2014 del SPEI-12, calculado en base a la ETP.

En general a nivel país se observa un patrón heterogéneo y a veces no continuo en el sentido norte sur de la magnitud de la sequía. Los resultados de esta sequía presentan patrones diferentes de acuerdo al umbral de afectación que se considere. Por ejemplo si solo consideramos la sequía extrema, donde el déficit ha sido de mucha intensidad pero por un periodo de tiempo acotado, aparecen una cuenca altiplánica (código 100), una cuenca costera de la región de Coquimbo (cod. 406) y una cuenca de la región de los lagos (cod. 1009), el resto del país presenta poca incidencia de esta condición extrema. Por otro parte, si observamos el mapa de Chile considerando el valor umbral de sequía severa, llama la atención los valores negativos que presentan las cuencas del altiplano y del norte chico así como numerosas cuencas de la zona sur e incluso austral. Finalmente, considerando el indicador de sequía moderada, el cual integra aquellas severas y extremas, se observa que las cuencas del norte Chico presentan valores más importantes de déficit, seguidos por cuencas de la zona centro sur como Maule, Mataquito y cuencas costeras de la misma zona. Más al sur se registran niveles de déficit comparables para cuencas de la zona costera de la región del Biobío y las cuencas de los ríos Imperial, Toltén, Valdivia y Maullín. En la zona austral, las cuencas costeras e Islas entre Río Palena y Río Aysén presentan un déficit mayor que el resto de las cuencas aledañas.

Cabe mencionar que para las cuencas correspondientes a zonas áridas y semiáridas de Chile, la climatología nos indica que estas zonas están sujetas a sequías estructurales de varios años, las cuales se dan de forma natural. Este aspecto teórico debe ser tomado en consideración para el análisis comparativo de las cuencas ubicadas en estas zonas con respecto a aquellas ubicadas en el resto del país donde las sequías no son largas y recurrentes, en especial si consideramos un periodo de solo 15 años de observación.

Tendencias de las variables del ciclo hidrológico

El análisis de tendencia para la precipitación, evapotranspiración potencial y real nos muestra resultados acordes a los obtenidos por el índice SPEI. En efecto se observa que las precipitaciones disminuyen en casi todo el país a excepción del altiplano y los cambios significativos se presentan entre la región de Atacama y la de los Lagos (Figura 6). Por otro lado, la tendencia es al aumento de la evapotranspiración potencial (ETP) en casi todo el país a excepción de la zona extremo norte siendo significativo su aumento entre las zonas de Vallenar y Elqui y en la zona centro sur entre Maule y los Ríos (Figura 7). Las disminuciones significativas de la precipitación y el aumento significativo de la ETP coinciden con las cuencas de mayor déficit hídrico destacándose dos grandes zonas, la zona entre Vallenar y Elqui y la zona entre Maule y los Ríos.

Por otra parte el consumo de agua evaluado a través de la ETR (Figura 8), nos muestra que la zona entre Copiapó y Maule presenta bajas significativas en esta variable, explicando una baja en la actividad de la vegetación de estas zonas que está sometida a condiciones restrictivas de lluvia de forma natural pero que se ha visto exacerbada en estos últimos 15 años. Por otro lado el consumo en la zona entre Maule y el resto de la zona sur del país incluida la zona de Magallanes ha visto un aumento del consumo de agua por parte de la vegetación lo que responde a las condiciones favorables de demanda atmosférica registrada en esta zona por un aumento de la ETP.

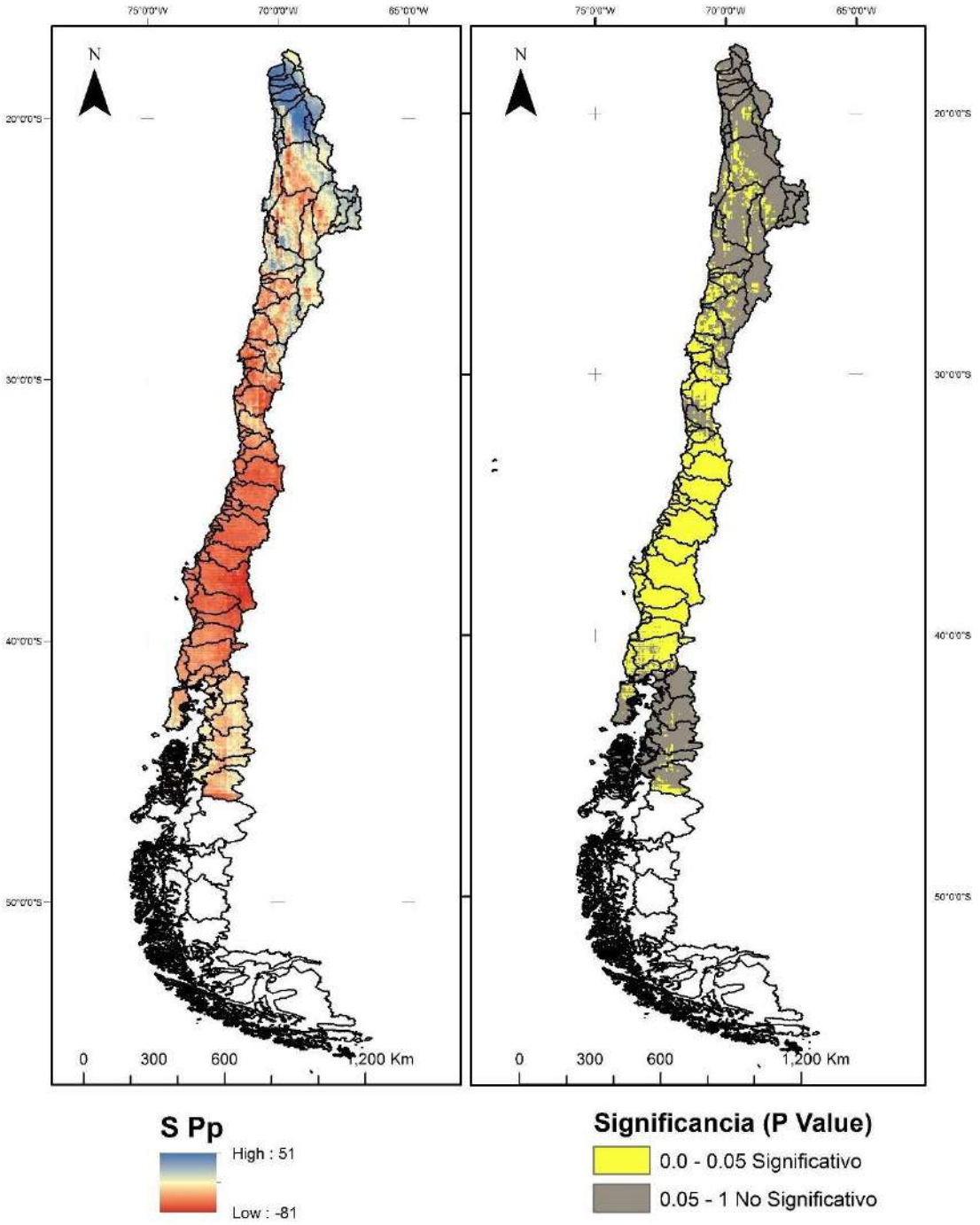


Figura 6. Valor S de la magnitud de la tendencia en mm por 15 años para la precipitación y significancia de acuerdo al test de Mann-Kendall.

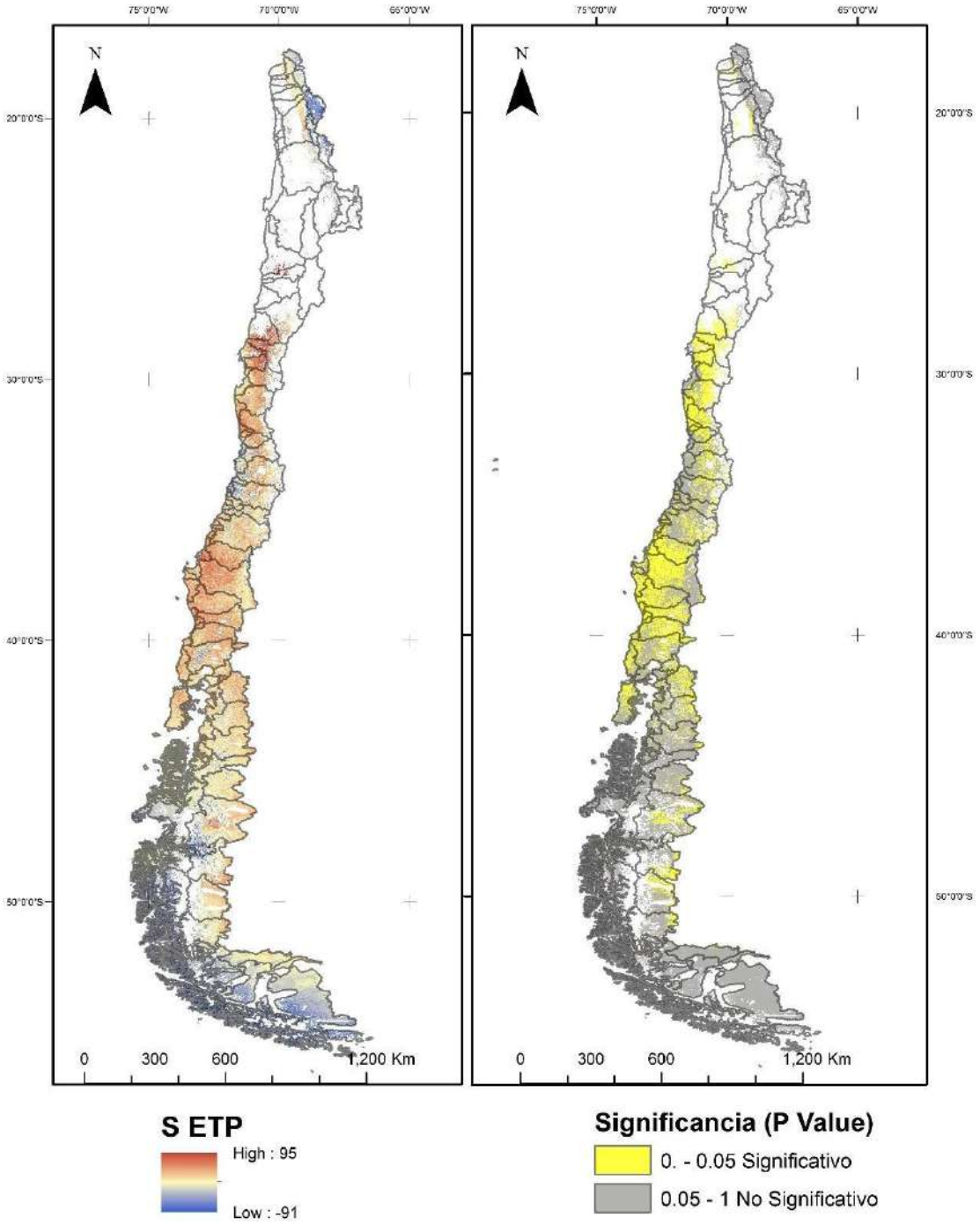


Figura 7. Valor S de la magnitud de la tendencia en mm por 15 años para la evapotranspiración potencial (ETP) y significancia de acuerdo al test de Mann-Kendall.

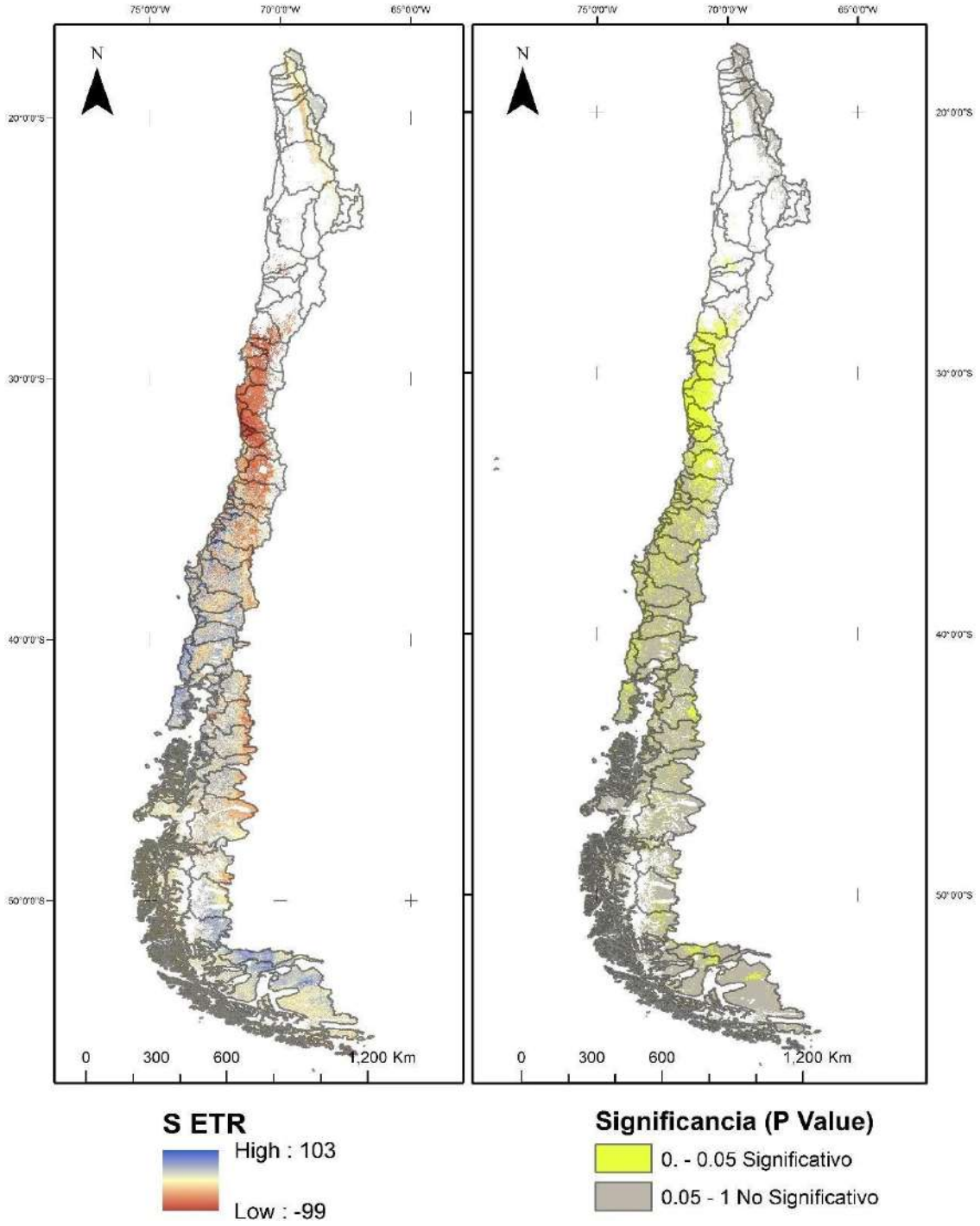


Figura 8. Valor S de la magnitud de la tendencia en mm por 15 años para la evapotranspiración real (ETR) y significancia de acuerdo al test de Mann-Kendall.

Evaluación de los productos satelitales a escala país

Las magnitudes son exactas para la precipitación con algo de cuidado en la zona al norte de la región de Coquimbo donde se presentan valores sesgados de precipitación los cuales pueden presentar escasa precisión en la sectores desérticos de la costa o del valle interior donde las lluvias son muy escasas. Por otra parte la precisión del producto también presenta mayores fallas en la zona al sur de la región de los Lagos principalmente por un problema de sesgo (Figura 9).

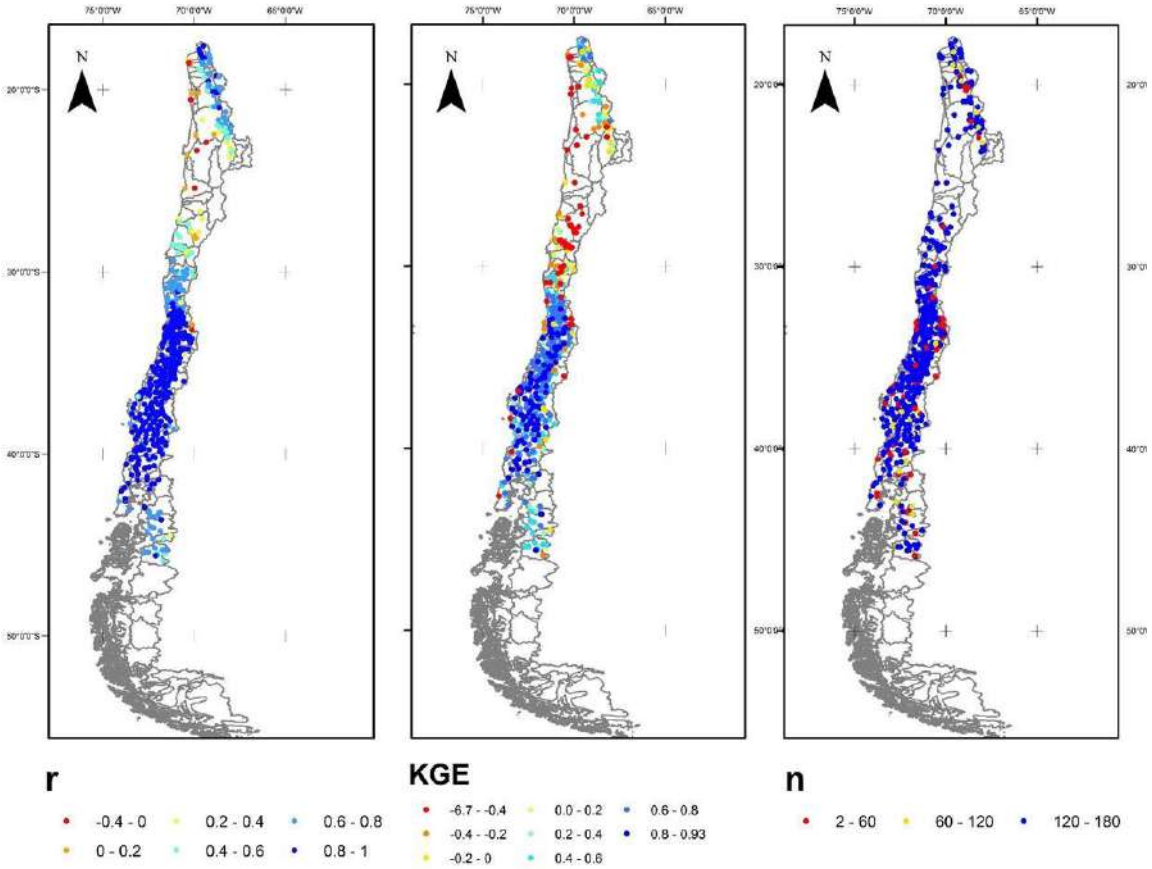


Figura 9. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Con respecto al producto satelital de ETP, este presenta una precisión adecuada en todo Chile a excepción de la región de Arica-Parinacota y la de Tarapacá, donde la correlación es inferior al 60%. Por otro parte el producto presenta problemas de sesgo para todo el país con una sobreestimación sistemática del producto. Solo la región de Aysen y la de Magallanes entregan una mayor exactitud en las estimaciones (Figura 10). Esto permite garantizar el uso del índice para evaluar el déficit hídrico dado su elevada precisión, parámetro estadístico más importante para evaluar tendencias.

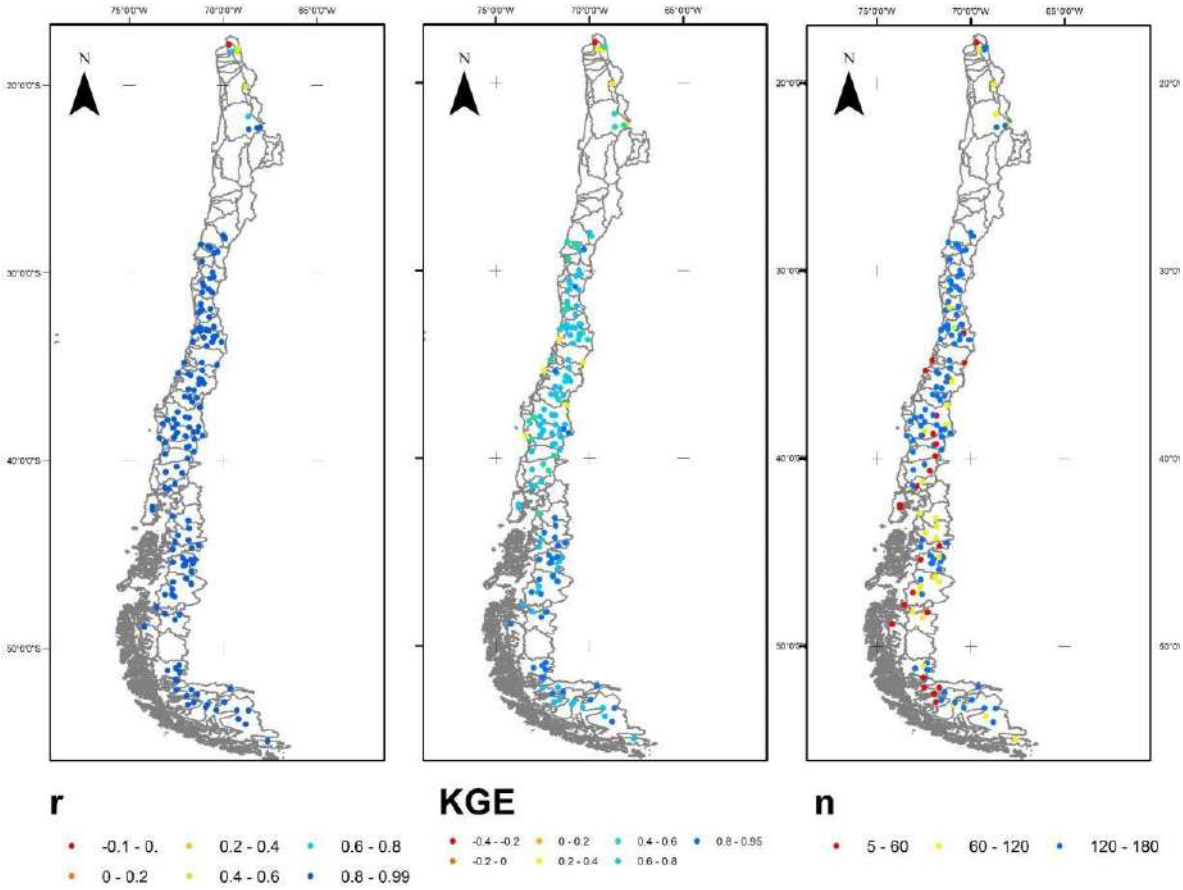


Figura 10. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Análisis regional del déficit hídrico

Región de Arica-Parinacota

La región presenta un déficit importante, en particular para el indicador de sequía moderada, lo que es propio de estos territorios desérticos en su mayoría, como ya se comentó previamente. Entre las cuencas con mayor magnitud de sequía moderada se destaca la cuenca altiplánica del Río Ushusuma la cual se detalla a continuación.

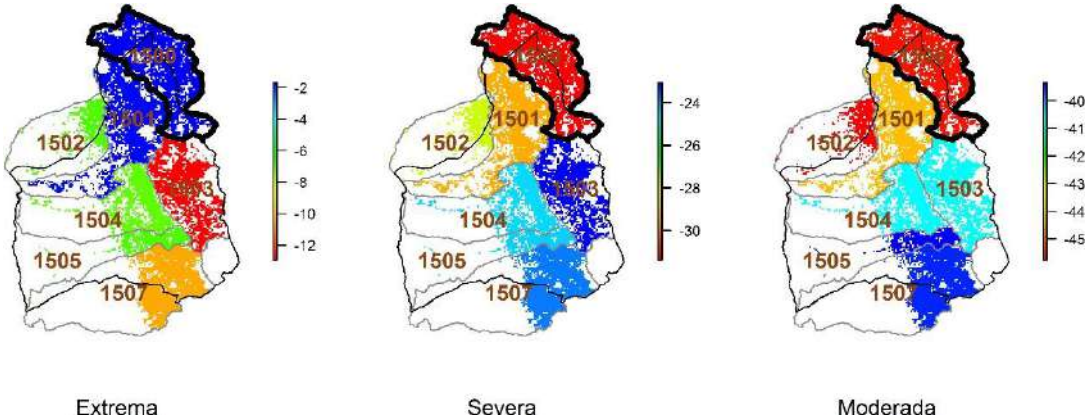


Figura 11. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Arica-Parinacota, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca Rio Ushusuma (cod. 1500)

Variaciones anuales

La cuenca no presenta variaciones claras para ninguna de sus variables durante el periodo de estudio, mostrando un periodo de altas precipitaciones al comienzo y final aludiendo a la alta variabilidad natural de la zona de estudio. De la misma forma se observa que las otras variables responden de forma simétrica a este patrón.

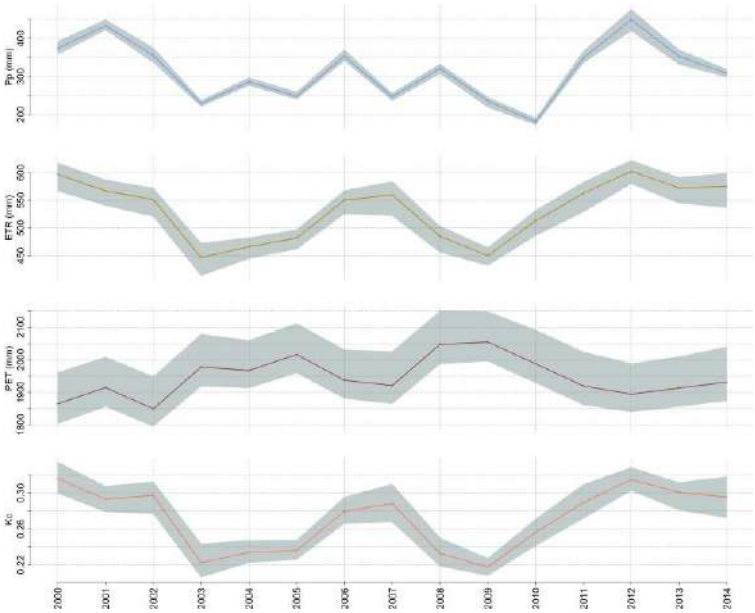


Figura 12. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

Quinquenios

El análisis por quinquenio (figura 12), nos muestra una clara disminución de las precipitaciones durante el quinquenio 2005-2009, lo que no se ve reflejado para la ETP y ETR. Este periodo de déficit entre dos periodos de lluvias más abundantes tiene característica de déficit cíclico sin una tendencia marcada.

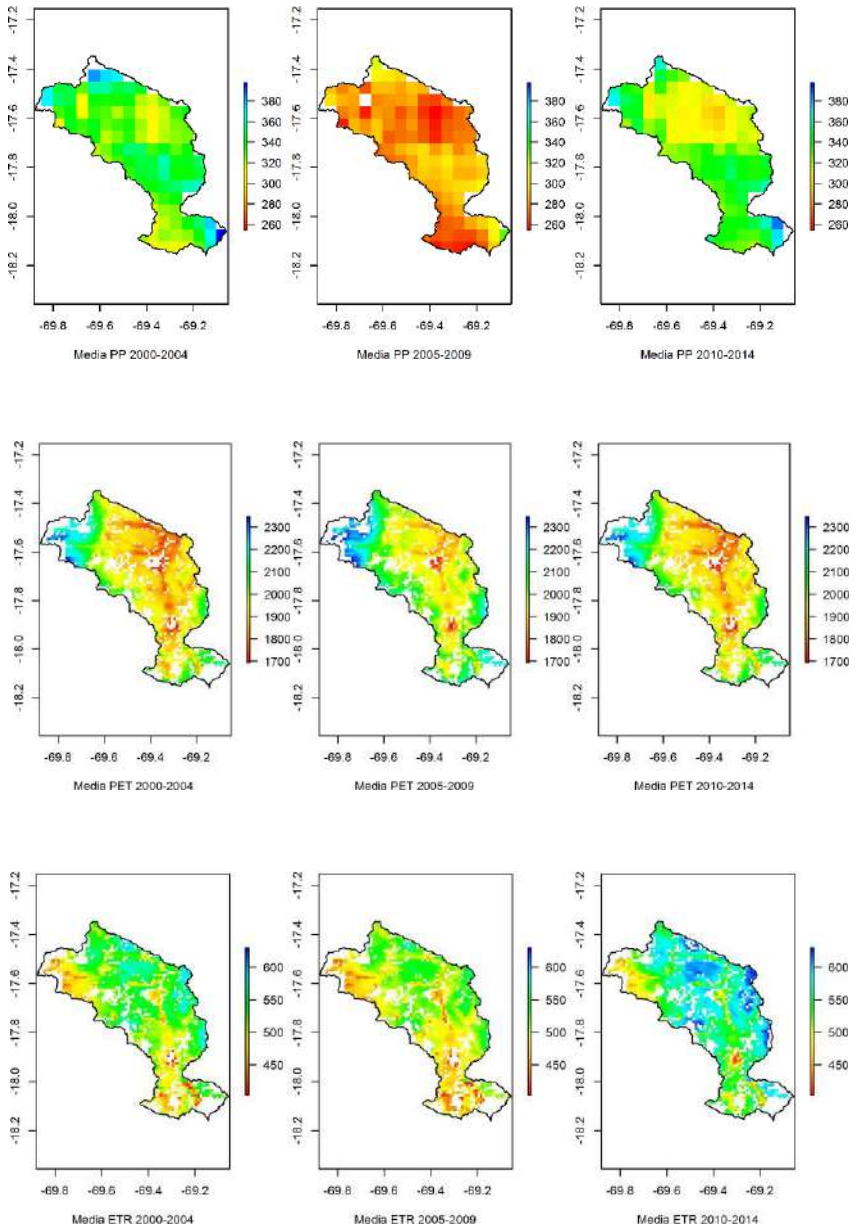


Figura 13. Cartografías de precipitación, ETR y ETP media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

Las tendencias registradas no son significativas para esta cuenca, lo que demuestra los resultados de falta de tendencias claras, en general se observan valores ligeramente negativos para las precipitaciones, con tendencias ligeramente positivas para la ETP y la ETR.

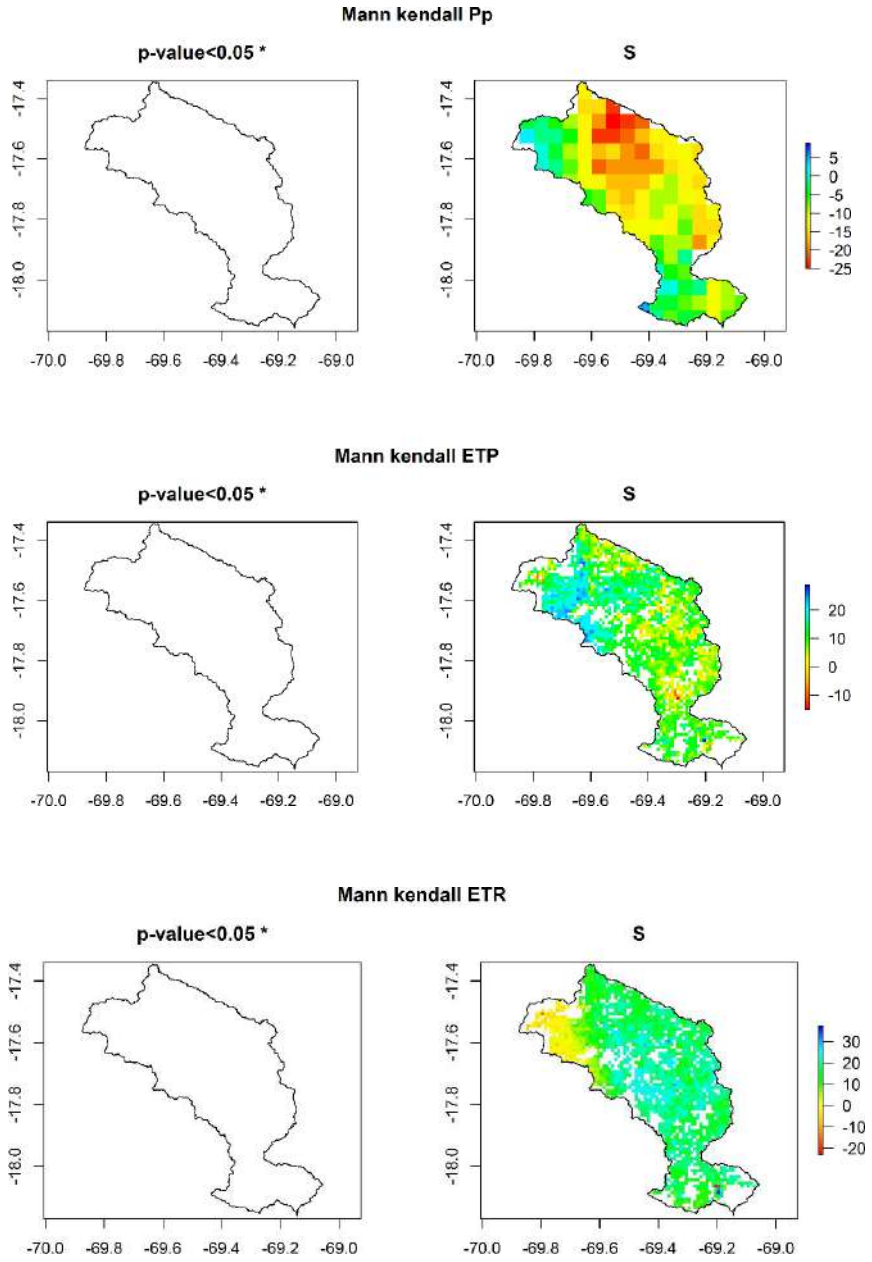


Figura 13. Figuras de Tendencias anuales de precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La precipitación pudo ser comparada contra dos estaciones meteorológicas en 178 y 168 meses respectivamente. La correlación entre ambas estimaciones es alta con valores superiores a 0.8, y el índice KGE presenta valores correctos para la estación norte con un rango entre 0.6 y 0.8, y valores incorrectos en la zona sur, con valores sesgados siendo su KGE cercano a 0. Esto implica que las estimaciones de Pp deben ser tomadas con precaución en la zona sur de la cuenca.

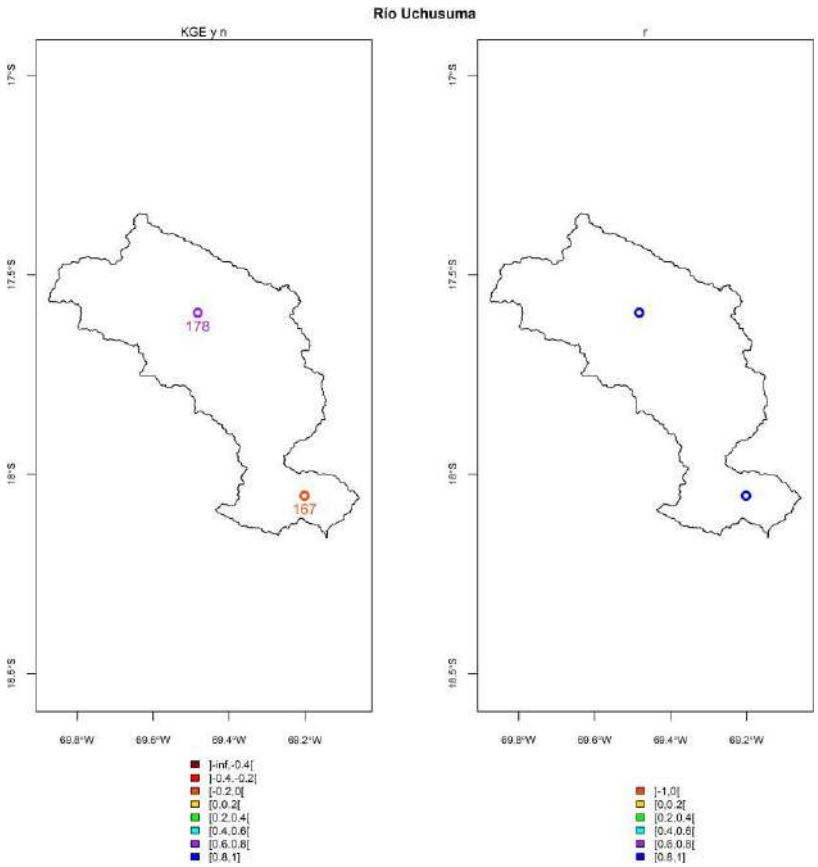


Figura 14. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

Los productos satelitales de ETP, para esta cuenca solo pudieron ser comparados contra una estación meteorológica con 129 meses de observación (figura 15). En esta los valores de las estimaciones satelitales presentan un valor de correlación medio (entre 0.4 y 0.6), con los mismos valores para el KGE, lo que demuestran un ajuste aceptable para esta variable tanto para evaluar magnitudes así como tendencias.

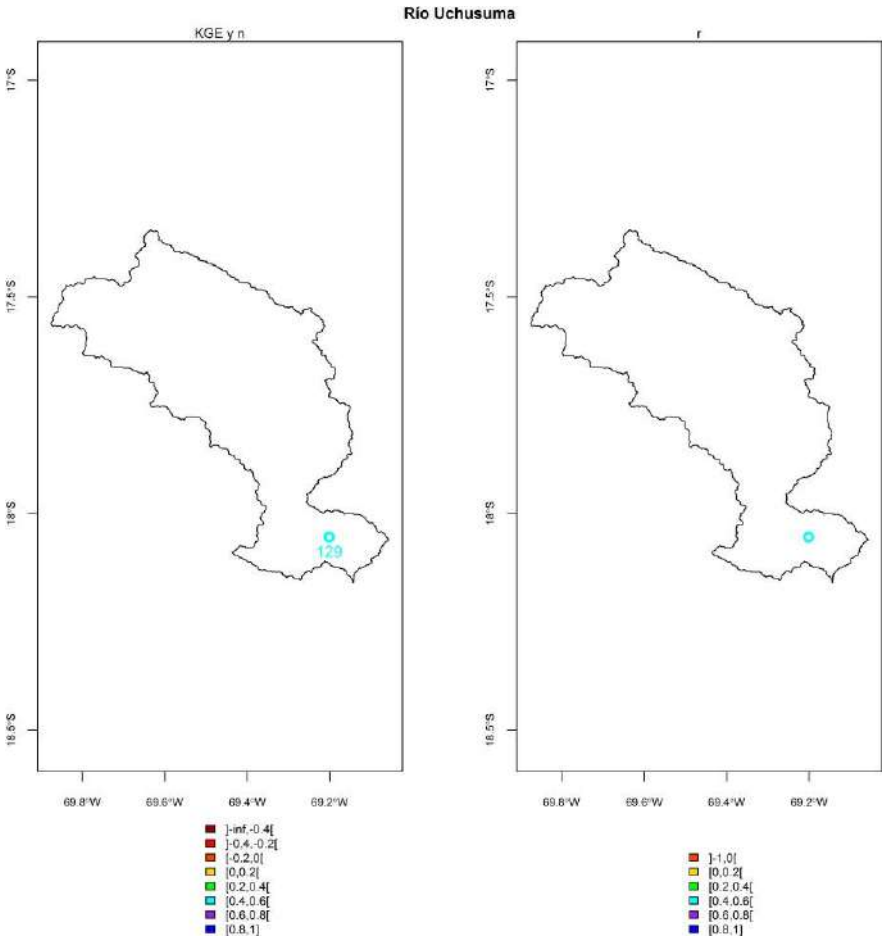


Figura 15. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice basado en la demanda de la atmósfera muestra un patrón similar al régimen de precipitaciones, mostrando no solo periodos de déficit importante entre enero 2009 y enero 2011 sino que también periodos de superávit severos de lluvia en 2001 y entre 2012 y 2013 Esto hace suponer que la cuenca se encuentra en un periodo de equilibrio en cuanto al volumen de agua caída en términos globales durante el periodo de análisis. La distribución espacial del SPEI muestra valores de magnitud moderada superiores en la zona norte y noreste de la cuenca, mientras para niveles de sequía severa la cuenca presenta un patrón más generalizado de déficit a excepción de la zona Sur (Figura 16).

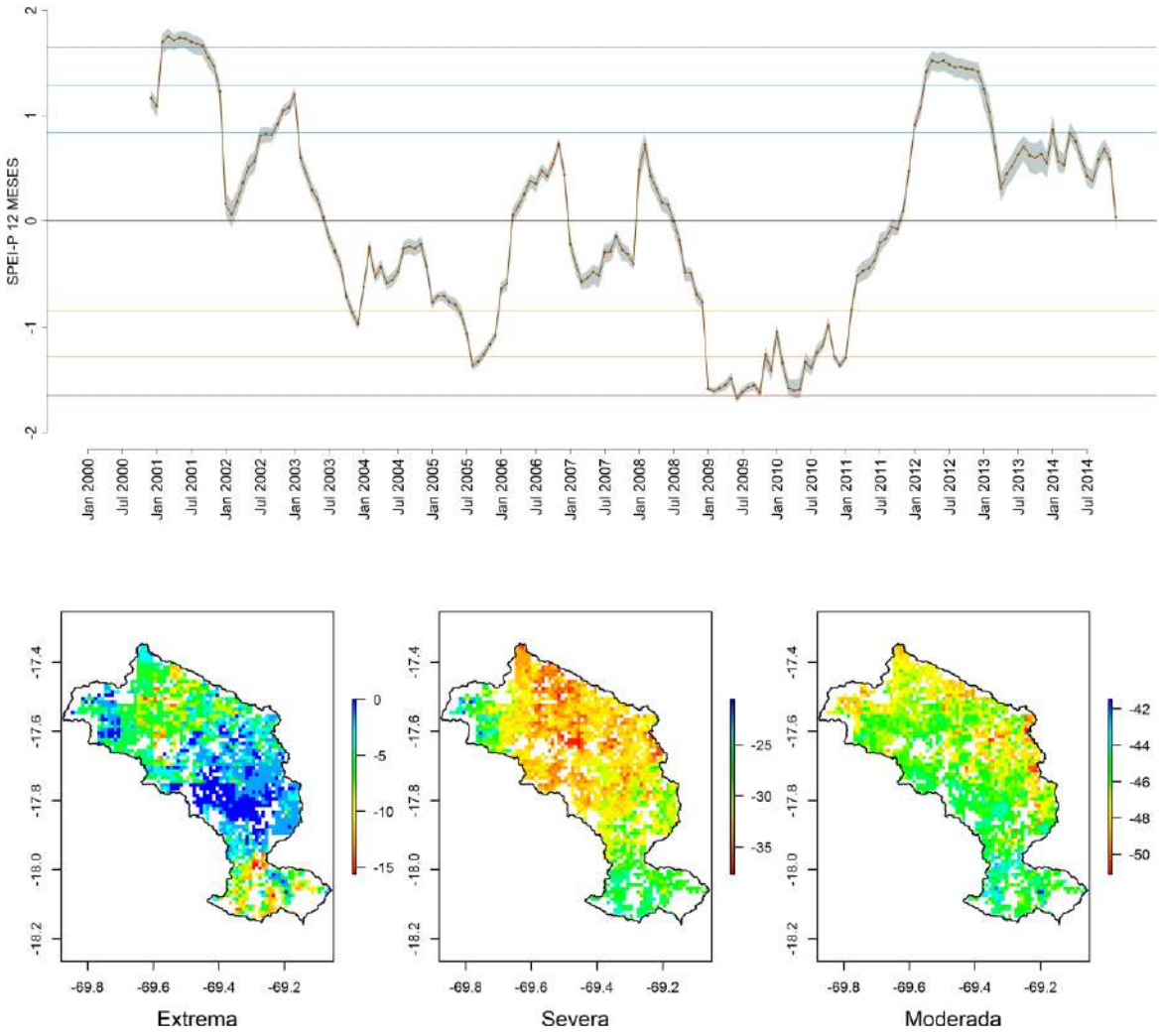


Figura 16. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta variaciones importantes de sus componentes del balance hidrológico presentado periodos de déficit y de superávit de forma consecutiva pero sin tendencias significativas. Estas variaciones podrían estar aludiendo a condiciones naturales de variabilidad climática, las cuales son propias a condiciones altiplánicas.

Región de Tarapacá

La región presenta cuencas altiplánicas y cuencas localizadas en la zona de central y costera, estas últimas presentan escasas precipitaciones y escasa cobertura vegetal por lo cual los productos satelitales no tienen datos. En general las cuencas altiplánicas presentan niveles altos de sequía (Figura 17), aunque inferiores a los niveles de la región de Arica y Parinacota.

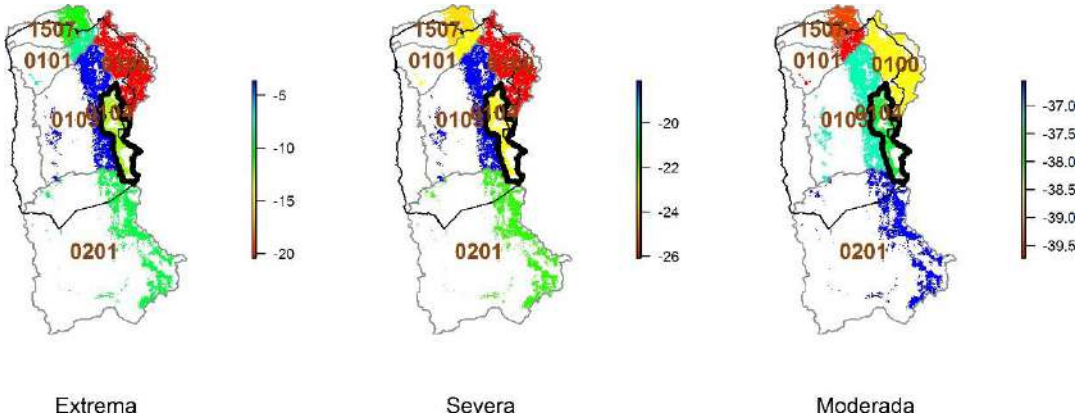


Figura 17. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Tarapacá, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de Cuenca Altiplánica desde limite regional Sur hasta Río Huayco (cod. 0104)

Variaciones anuales

Las variaciones de las variables son similares a la región de Arica Parinacota sin registrarse una tendencia marcada a cambios en la precipitación (Figura 18), lo que tampoco se observa para la ETP y la ETR. Se observan un periodo inicial de lluvias con altos valores al igual que aquellos de ETR durante los años 2000-2001 y después un periodo estable hasta el año 2011 donde se observa nuevamente aumento de la Pp y de la ETR junto de una disminución de la ETP probablemente debido a un periodo de mayor nubosidad.

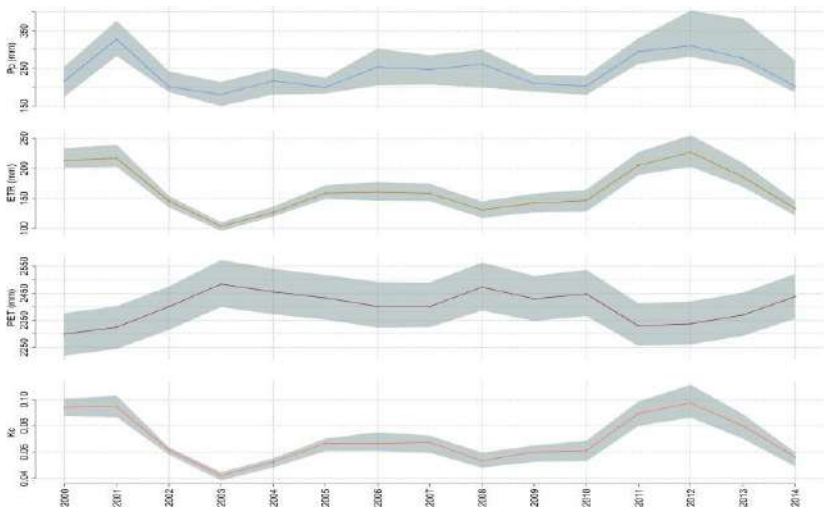


Figura 18. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

Quinquenios

El análisis espacial por quinquenios nos indica que la cuenca presenta dos zonas marcadas de régimen de Pp con valores superiores a los 300 mm para la zona norte y valores muy por debajo de esto en la zona sur (Figura 19). Se observa que durante el último quinquenio se registra un aumento de la Pp en la cuenca. Las variables de ETP y ETR presentan un patrón bastante heterogéneo dentro de la cuenca probablemente debido a diferencias de elevación dentro de la cuenca lo que ocasiona diferentes intensidades de Pp con valores superiores en la zona oeste de la cuenca donde hay mayores elevaciones. La zona este presenta valores inferiores de Pp lo que se traduce en valores bajos de ETR, pese a existir valores altos de ETP. No se presenta mayor variación durante los diferentes quinquenios lo que denota una situación de normalidad meteorológica de la cuenca considerando el periodo de 15 años entre 2000 y 2014.

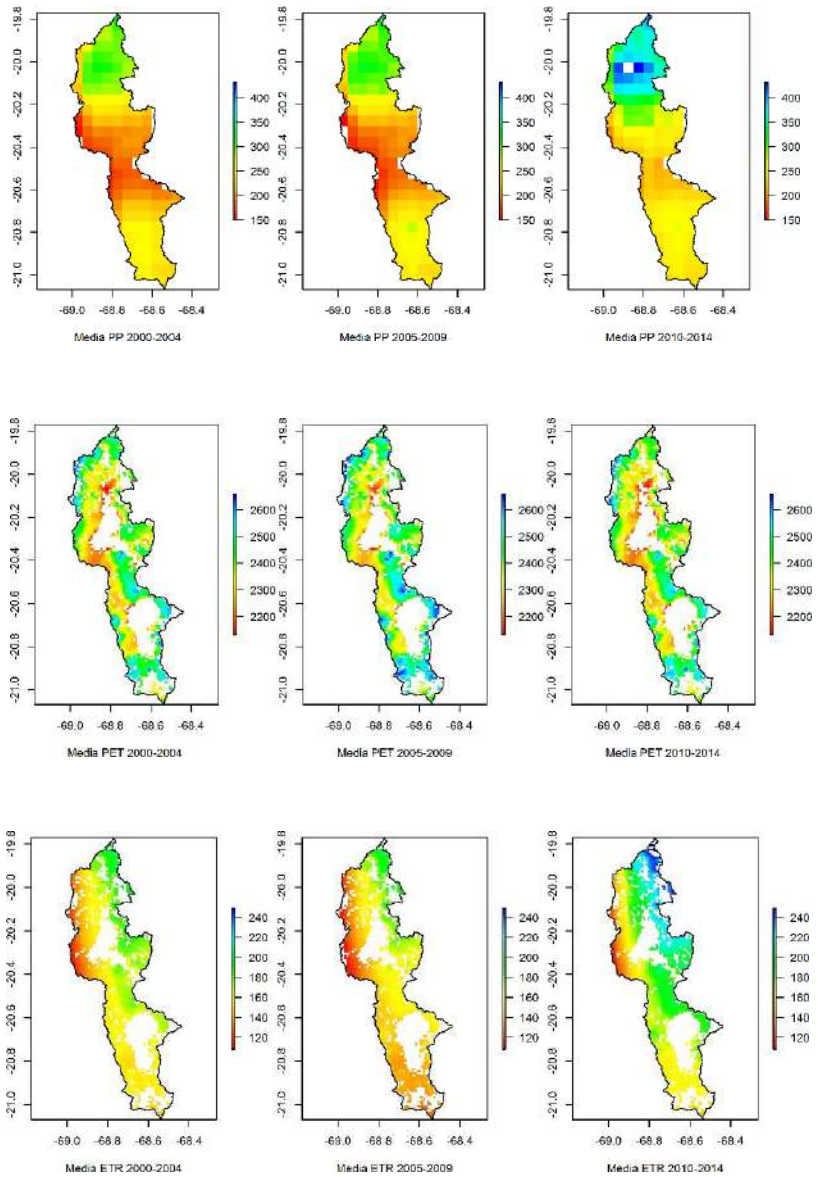


Figura 19. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

Las tendencias registradas no son significativas para esta cuenca (Figura 20), a excepción de una zona ubicada al centro-norte de la cuenca, en general se observan valores ligeramente positivos para las precipitaciones, los cuales pueden llegar a 40 mm de aumento en la zona de cambios significativos, y valores levemente negativos en la zona sur de la cuenca. La ETP presenta tendencias levemente positivas en la cuenca y la ETR tendencias ligeramente positivas en la zona norte y negativas en la zona sur, lo que se asocia a las variaciones de Pp.

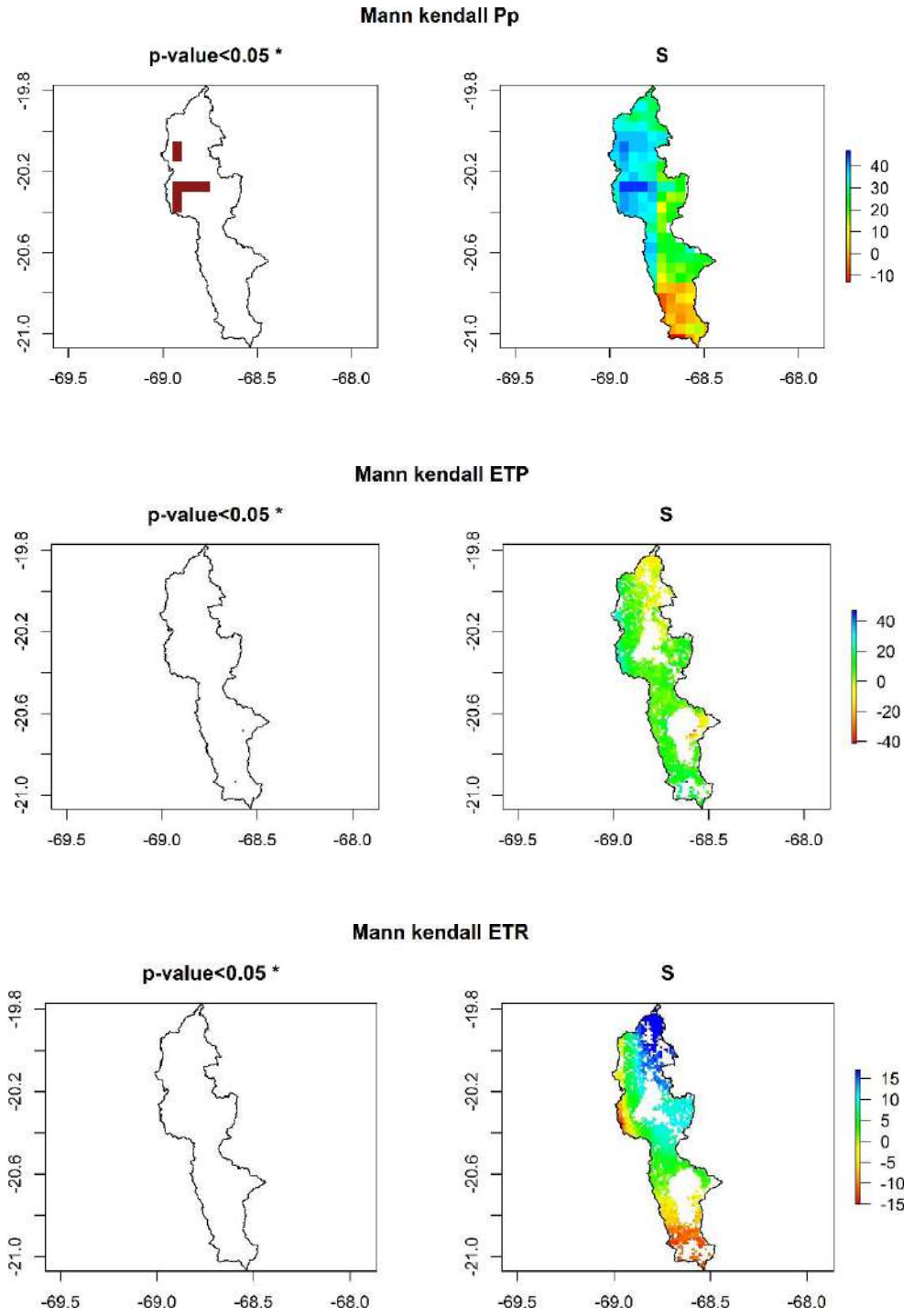


Figura 20. Figuras de Tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

Existen 8 estaciones meteorológicas para comparar los datos de lluvias obtenidos de los productos satelitales, en la mitad de ellas hay más de 170 registros mensuales y en la otra cerca de 35. Los valores de correlación observados son superiores a 0,6 para todos los casos con la mitad de las estaciones registrando valores superiores a 0,8 (Figura 21). El valor de KGE fluctúa en su mayoría entre 0 y 0,6, lo que demuestra un problema de sesgo en las estimaciones satelitales, por lo que deben tomarse con precaución en su interpretación de valores de magnitud por sobre la tendencia.

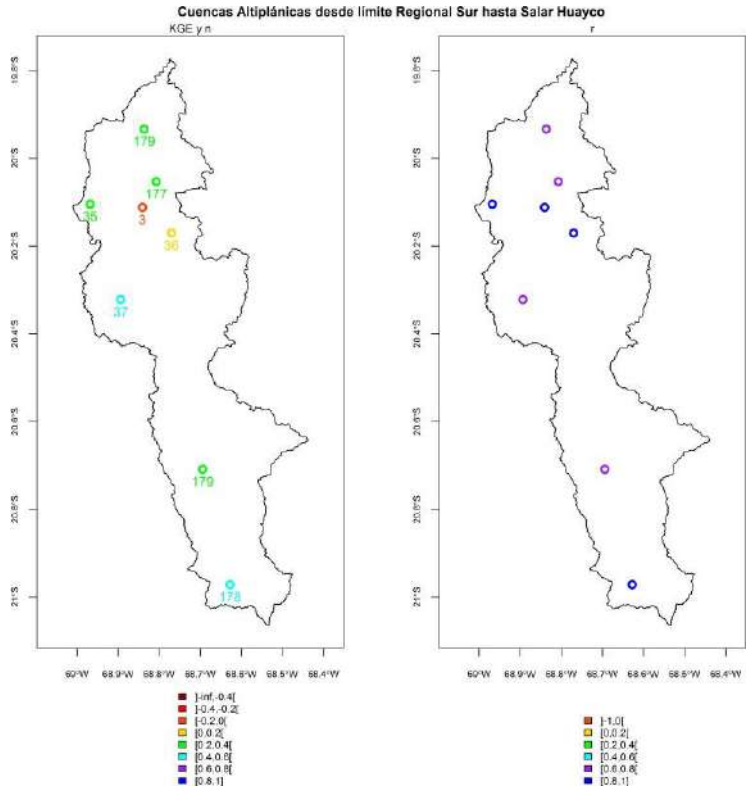


Figura 21. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca solo presenta una estación de comparación para esta variable con 115 registros mensuales. Los valores de correlación se sitúan en una situación intermedia con valores entre 0.4 y 0.6 y el valor de KGE se ubica entre 0.2 y 0.4 (Figura 22) por lo que la cuenca presenta ajustes apenas aceptables para esta variable, por lo que los datos derivados de satélites deben tomarse con precaución.

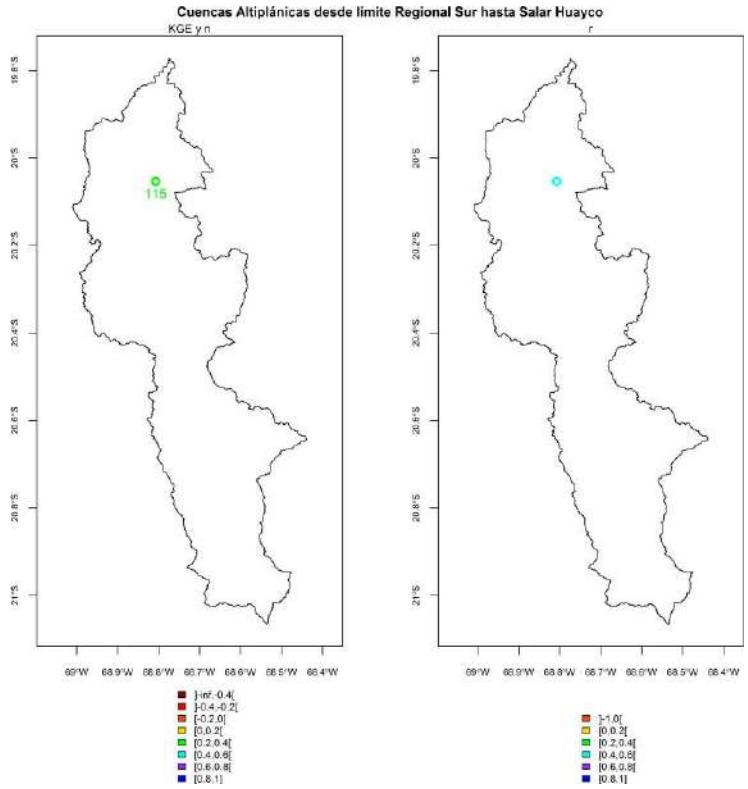


Figura 22. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice basado en la demanda de la atmósfera, el ETP, muestra un patrón similar al régimen de precipitaciones, mostrando no solo periodos de déficit importante en el invierno 2003 y el verano 2009, sino que también periodos de superávit severos de lluvia en 2001 y entre 2012 y 2013 (Figura 23). Esto hace suponer que la cuenca se encuentra en un periodo de equilibrio hídrico en términos globales durante el periodo de análisis. La distribución espacial del déficit y superávit no muestra un patrón claro registrándose valores de sequía extrema en la zona este de la cuenca, mientras que en términos de sequía moderada se observan mayores valores en la zona oeste de la cuenca (Figura 23).

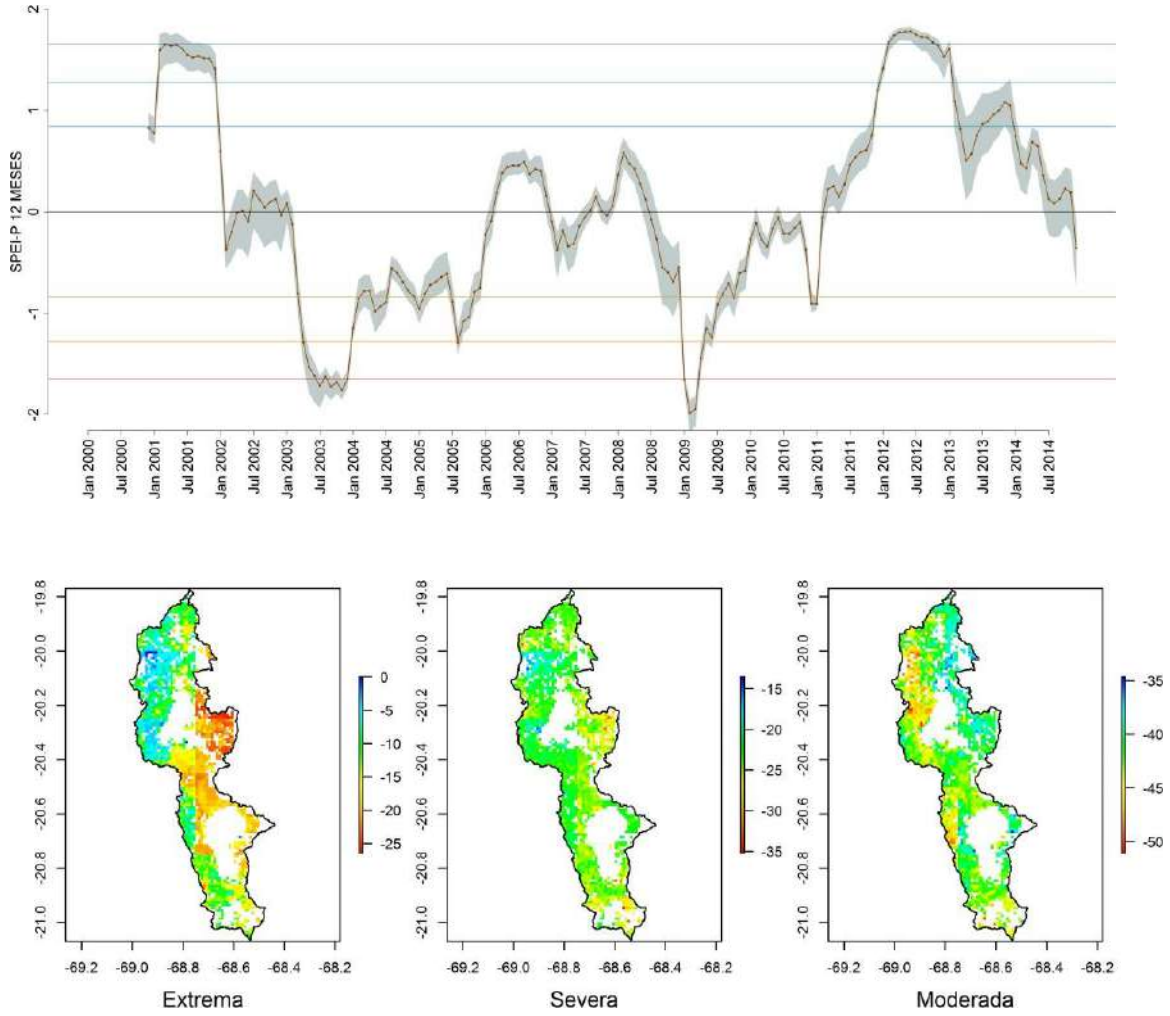


Figura 23. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta variaciones importantes de sus componentes del balance hidrológico presentado periodos de déficit y de superávit de forma consecutiva pero con poca tendencia significativa a excepción de la precipitación en el centro de la cuenca. Estas variaciones podrían estar aludiendo a condiciones naturales de variabilidad climática, las cuales son propias a condiciones altiplánicas. No obstante, el aumento generalizado de la precipitación y en particular en centro de la cuenca genera una situación de superávit para la zona.

Región de Antofagasta

Las cuencas de la región presentan en general escasos datos los que aparecen en la zona altiplánica a excepción de la zona sur de la región donde hay datos en algunos sectores de las cuencas de ese sector (Figura 24). En general los valores de déficit son muy elevados debido a la condición natural de híper-aridez de esta zona. Se selecciona la cuenca del río Loa para el análisis debido principalmente a su disponibilidad de datos para evaluar la certeza de los productos satelitales.

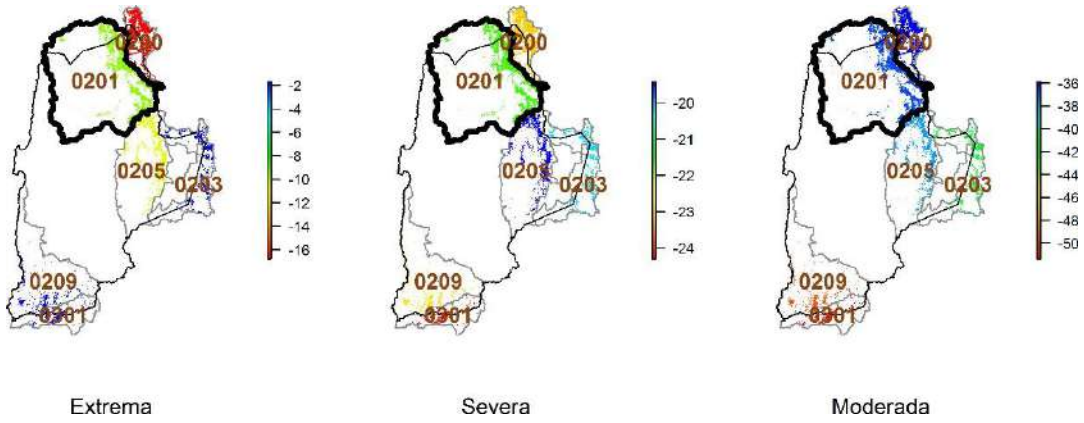


Figura 24. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Antofagasta, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca del Río Loa (cod. 0201).

Variaciones anuales

La cuenca presenta variaciones estables en la Pp con valores inferiores a los 50 mm anuales lo que denota su situación de híper-aridez (Figura 25). Las variables de evapotranspiración no presentan Variaciones claras, y sus valores presentan un patrón inverso con altos valores en 2000 y 2001 y en 2011 y 2012 para la ETR y viceversa para la ETP. Esto es consecuente con lo observado en las cuencas más nortinas analizadas previamente pero con la discrepancia que esta cuenca presenta mucho menos Pp y no presenta un aumento durante el último quinquenio de esta variable. Esta aparente contradicción se analiza más adelante en el texto y puede estar sujeta a errores de los productos satelitales.

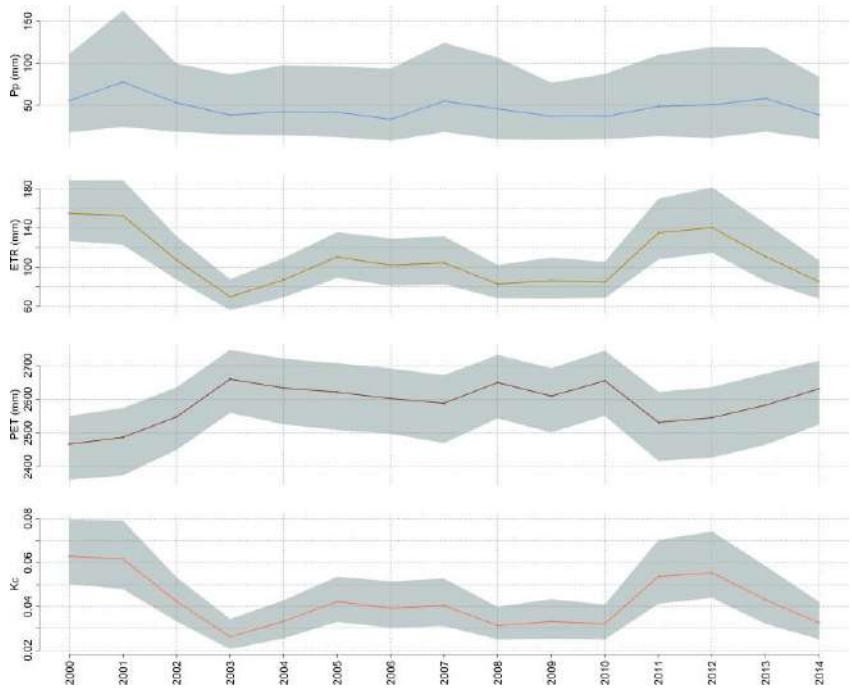


Figura 25. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

El análisis por quinquenio muestra una respuesta similar entre periodos, presentando un patrón espacial variable dentro de la cuenca, con valores más elevados de Pp en la zona altiplánica y en la zona costera (Figura 26). Los valores observados en esta última zona se alejan de la realidad lo que se ratifica en el análisis de validación de productos satelitales. El análisis por quinquenio de la ETP y ETR nos muestra la escasa superficie cubierta por vegetación de esta cuenca, y con valores sumamente bajos de ETR lo que responde a las bajas Pp registradas para esta zona, que tiene escasa vegetación al ser parte del desierto absoluto.

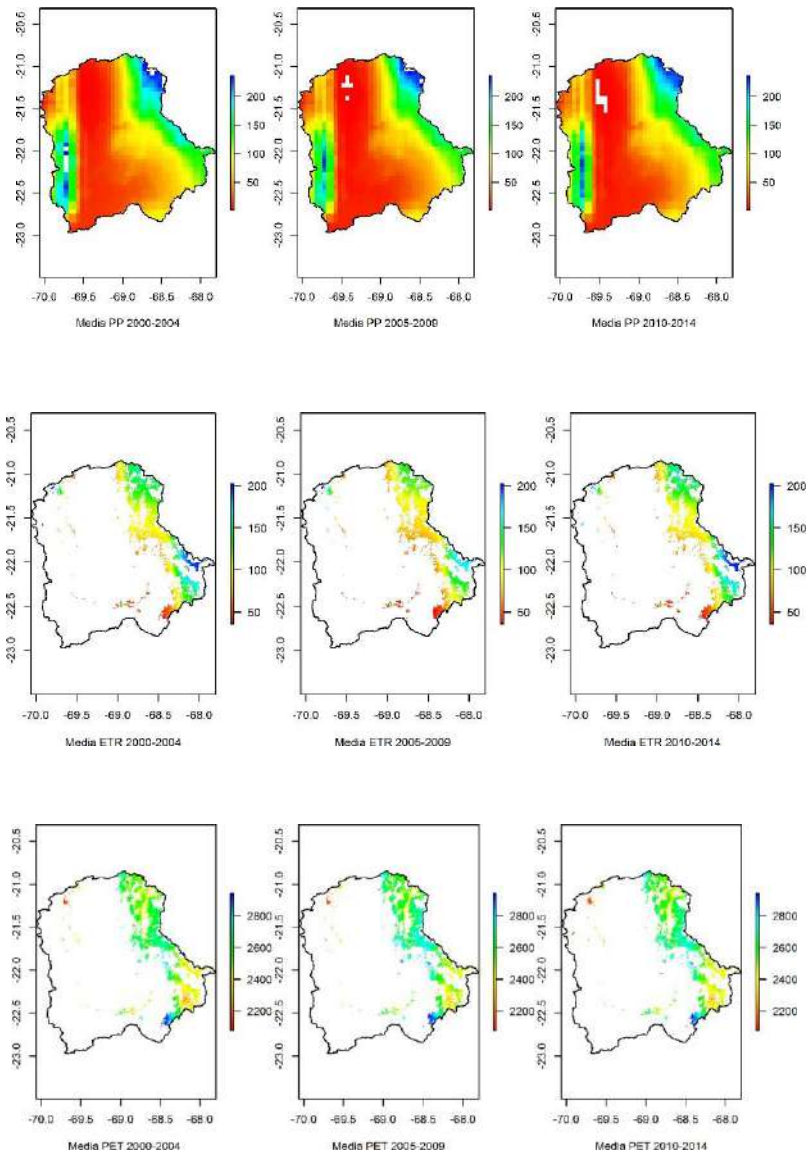


Figura 26. Cartografías de precipitación, ETR y ETP media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

Las tendencias son significativas unicamente para la Pp en la zona oeste de la cuenca, donde se ubica el desierto absoluto (Figura 27). La tendencia registrada debe tomarse con precaucion debido al carácter desertico donde no se ocasionan Pp de forma natural por periodos largos de tiempo, lo que ciertamente condiciona la consistencia de la serie temporal analizada que solo recoje 15 años de observación. La ETP registro una leve tendencia a aumentar y la ETR a disminuir en la zona altiplanica donde fueron evaluadas estas variables.

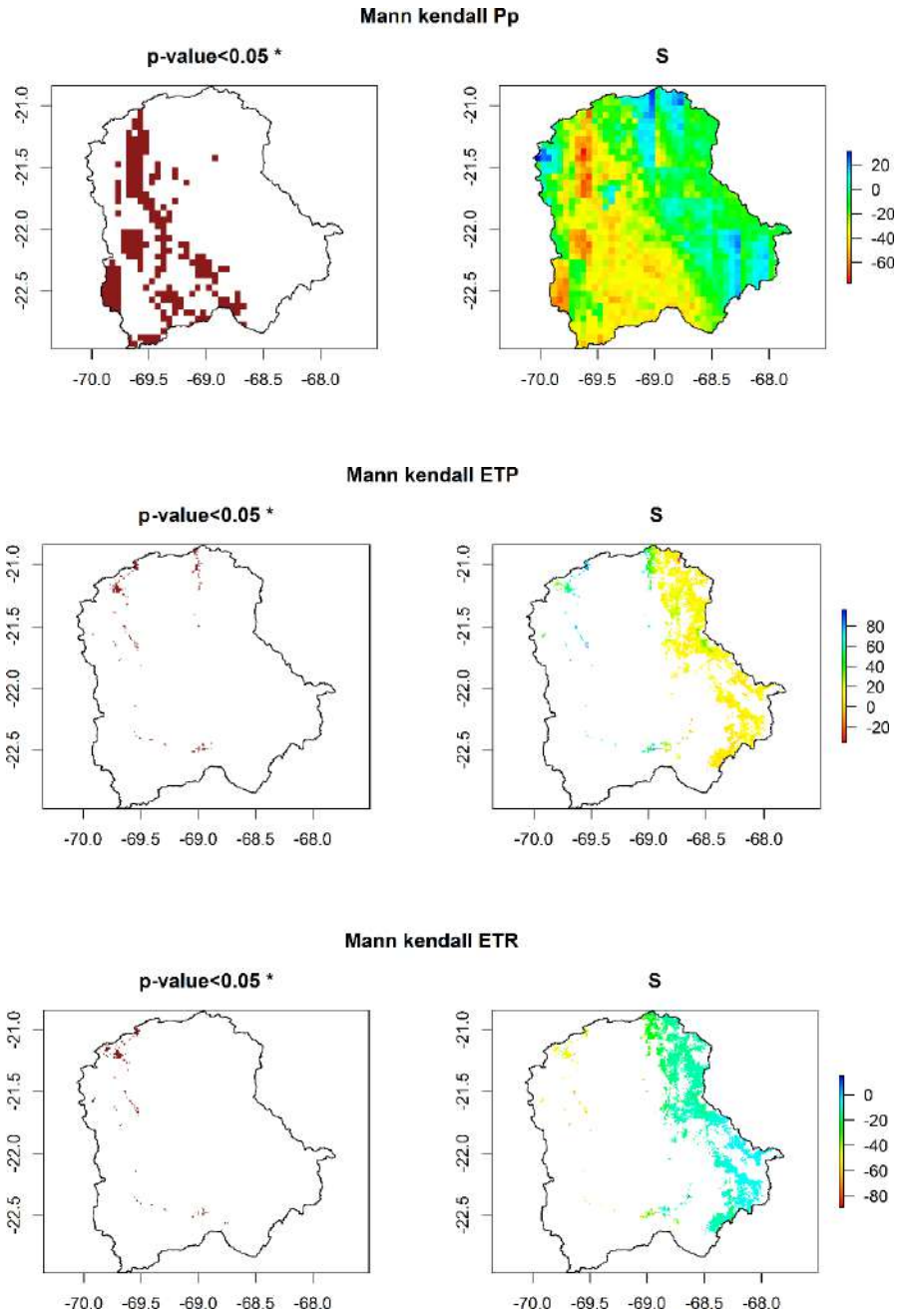


Figura 27. Figuras de Tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

Las estaciones de precipitación son numerosas en la cuenca con un periodo de registro superior a los 150 meses en la mayoría de los casos. Los valores de correlación de la variable varía en función de la posición de la estación (Figura 28), siendo el sector Este aquel que presenta correlaciones sobre 0,6 el cual decae hacia la zona oeste hasta tener un valor muy bajo en la zona suroeste. Los valores de KGE son muy variables presentándose valores positivos para la zona este de la cuenca y valores negativos en la zona oeste. Estos resultados nos indican que la variable Pp debe ser usada con precaución para el análisis ya que el producto satelital parece no tener buen rendimiento en zonas con tan escasas precipitaciones.

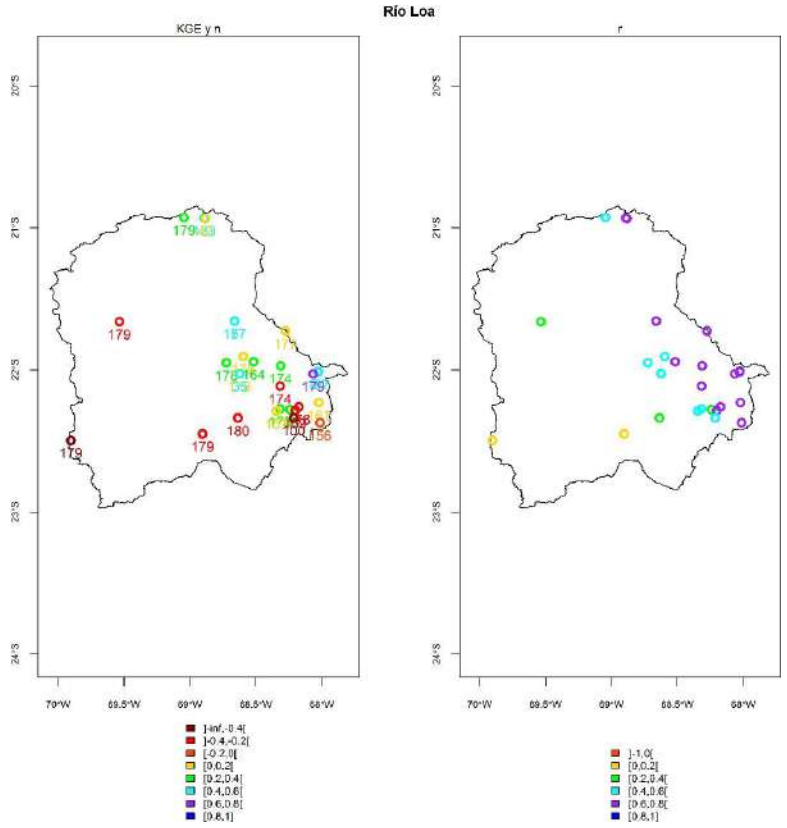


Figura 28. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta 4 estaciones meteorológicas las cuales se concentran en la zona este cerca de la cordillera de los Andes (Figura 29). El registro permitió comparar entre 115 y 180 meses de observaciones satelitales con valores de correlación adecuados (superiores a 0,6), y valores de KGE entre 0,2 y 0,6 lo que nos indica un problema de sesgo menor. No

obstante se puede concluir que los productos satelitales de ETP son adecuados para el diagnóstico.

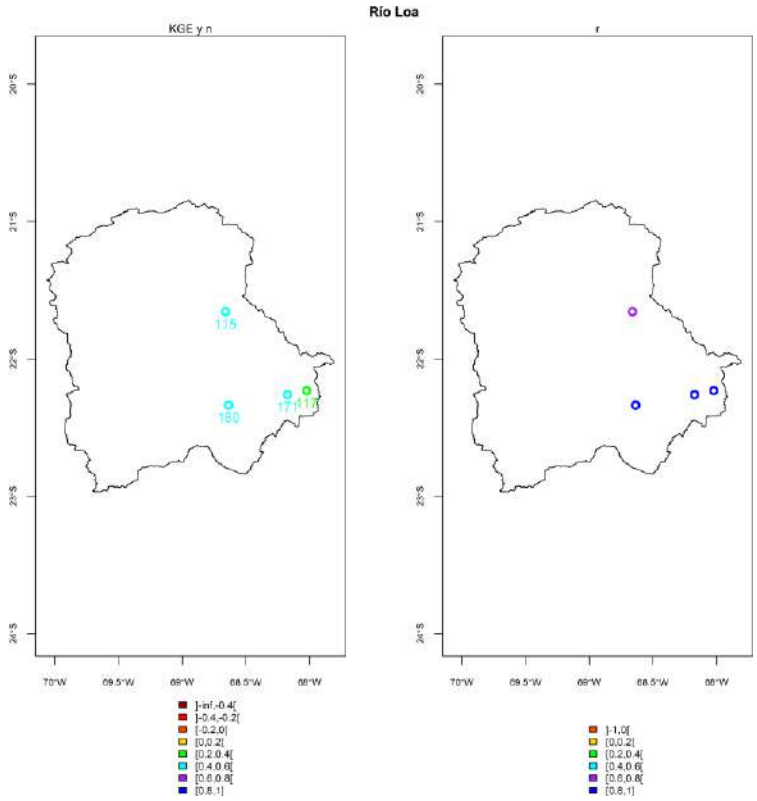


Figura 29. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

La cuenca no presenta una tendencia marcada al déficit o superávit, presentándose un comportamiento similar a las otras cuencas del norte grande previamente analizadas (Figura 30). Se observan periodos que muestran no solo periodos de déficit importante en el invierno 2003 y el verano 2009, sino que también periodos de superávit severos de lluvia en 2001 y entre 2012. Esto hace suponer que la cuenca se encuentra en un periodo de equilibrio hídrico en términos globales durante el periodo de análisis. La distribución espacial del déficit y superávit no muestra un patrón claro siendo la respuesta de la cuenca generalizada, y se registra el quinquenio 2005-2010 como aquel seco.

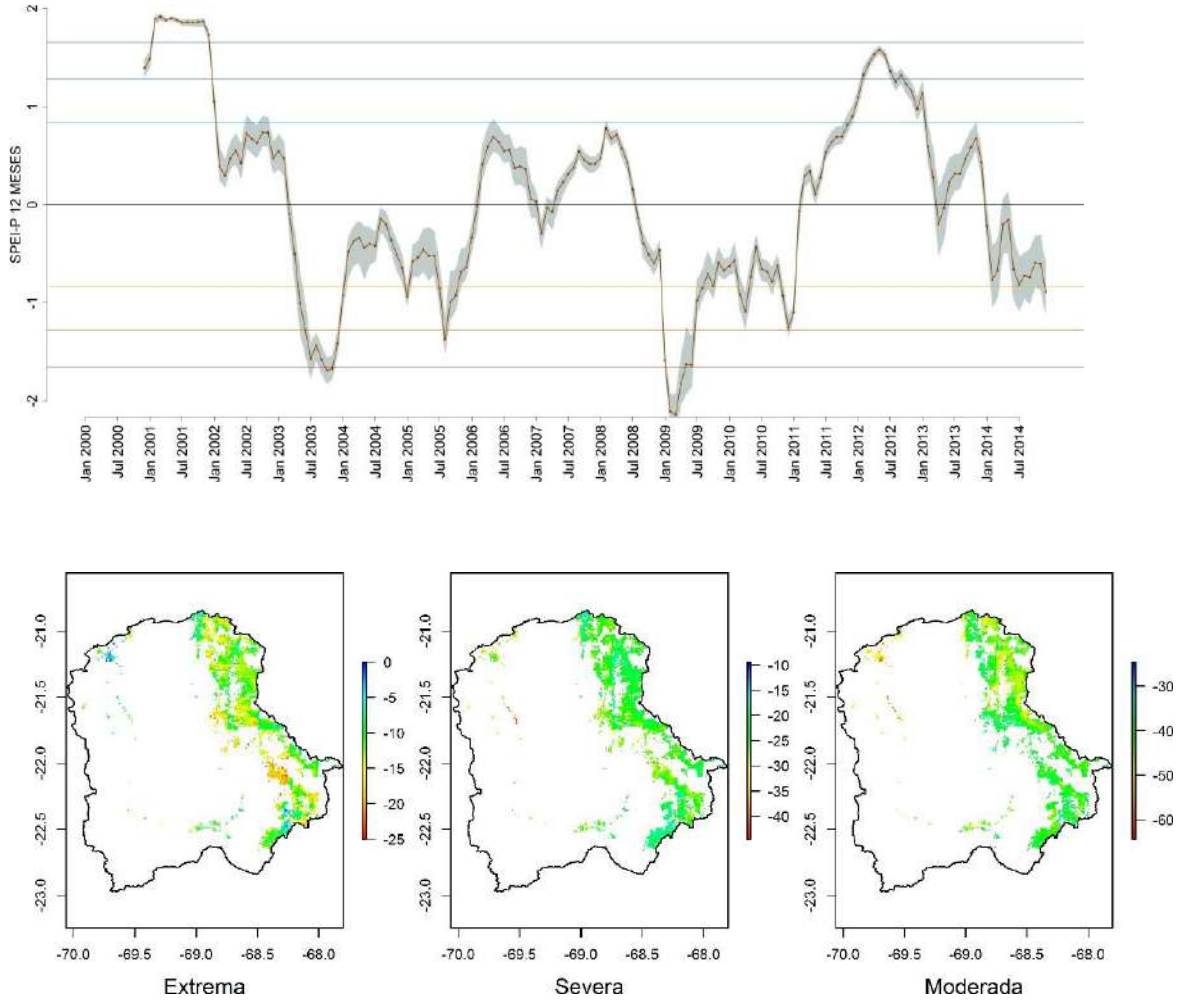


Figura 30. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta periodos equilibrados de déficit y superávit hídrico, no registrándose alguna tendencia clara. Cabe señalar la falta de robustez de las estimaciones satelitales de pluviometría en particular en la zona centro y oeste de la cuenca lo que impide concluir efectivamente sobre este sector de la cuenca.

Región de Atacama

La cuencas de la región presentan un régimen híper-árido, siendo aquellas localizadas en la zona sur, las que presentan más vegetación y por ende más datos de ET (Figura 31). Se registran valores importantes de déficit en términos de sequía severa y moderada para todas las cuencas de la región. Se escogió la cuenca del Rio Huasco debido a su importante déficit que experimenta y a la disponibilidad de datos para validar las estimaciones satelitales.

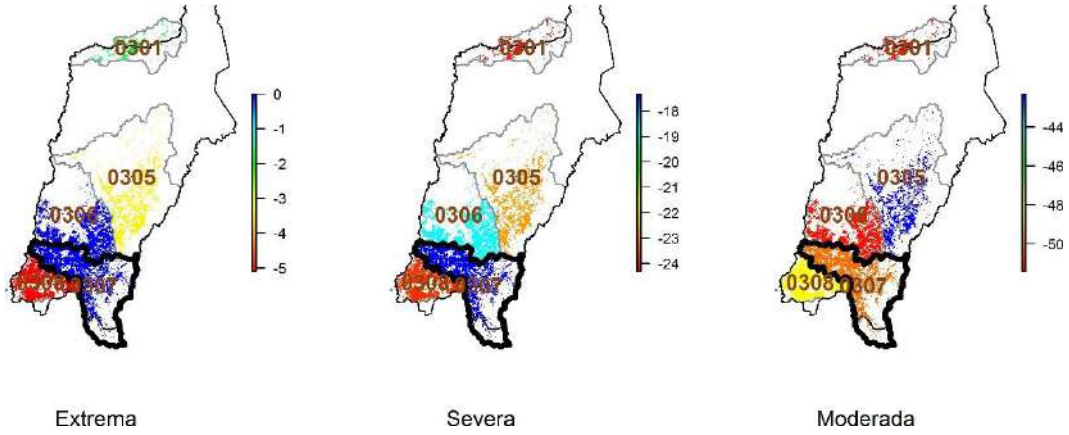


Figura 31. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Atacama, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca Rio Huasco (cod. 0307)

Variaciones anuales

A diferencia de las cuencas ubicadas más al norte, la cuenca del río Huasco presenta variaciones claramente marcadas hacia una disminución de la Pp, ETR y Kc y a su vez un aumento importante en la ETP (Figura 32). Para el caso de la precipitación esta presenta valores acordes a una zona desértica con valores entre 20 y 60 mm por año. La ETP registra un importante aumento en sus valores de lo que puede estar explicado por una mayor cantidad de días sin nubes además del incremento de temperatura del aire. La ETR es baja en este territorio siendo solo una fracción menor al 10% de la demanda atmosférica, pero superior a las Pp. Esto se puede explicar por el uso de reservas sub-superficiales contenidas en los acuíferos que son extraídos principalmente para la agricultura del sector y al aporte de la neblina marina en el caso de la vegetación natural. La proporción de consumo hídrico (ETR) es 3 o 4 veces mayor que el aporte de las precipitaciones, por ende la disminución de la ETR no debería estar explicada únicamente por el descenso de las precipitaciones, siendo necesario revisar otras variables del ciclo hidrológico tales como la acumulación de nieve y el caudal del río Huasco y el efecto de las neblinas.

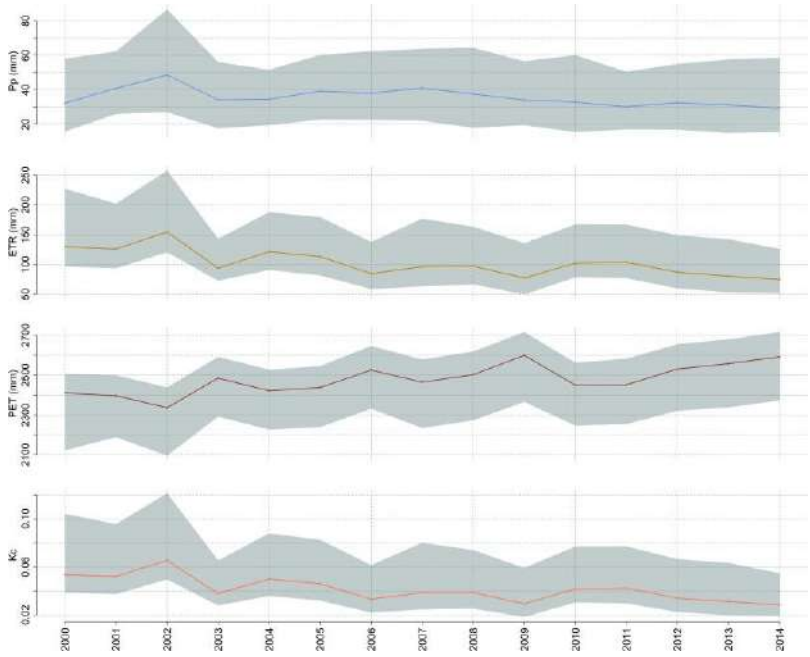


Figura 32. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

El análisis de quinquenios permite establecer grandes diferencias espaciales en la Pp (Figura 33), observándose valores siempre superiores a los 60 mm en la zona cordillerana de la cuenca y valores inferiores a los 30 mm en la zona poniente. La ETR presenta diferencias igualmente marcadas, destacándose los valores sobre 300 mm en la zona cercana al río Huasco y en su desembocadura, donde existe la mayoría de la agricultura de riego. En general la mayor superficie de la cuenca cubierta por vegetación nativa presenta una baja de la ETR particularmente durante los últimos quinquenios, demostrando un efecto de sequía sobre esa vegetación. La zona central de la cuenca presenta un aumento importante de la ETP y una fuerte baja de la pp lo que determina una menor ETR registrada en específico sobre la vegetación nativa de esa zona que no al registrar consumo de agua se encuentra en una fase de poca actividad.

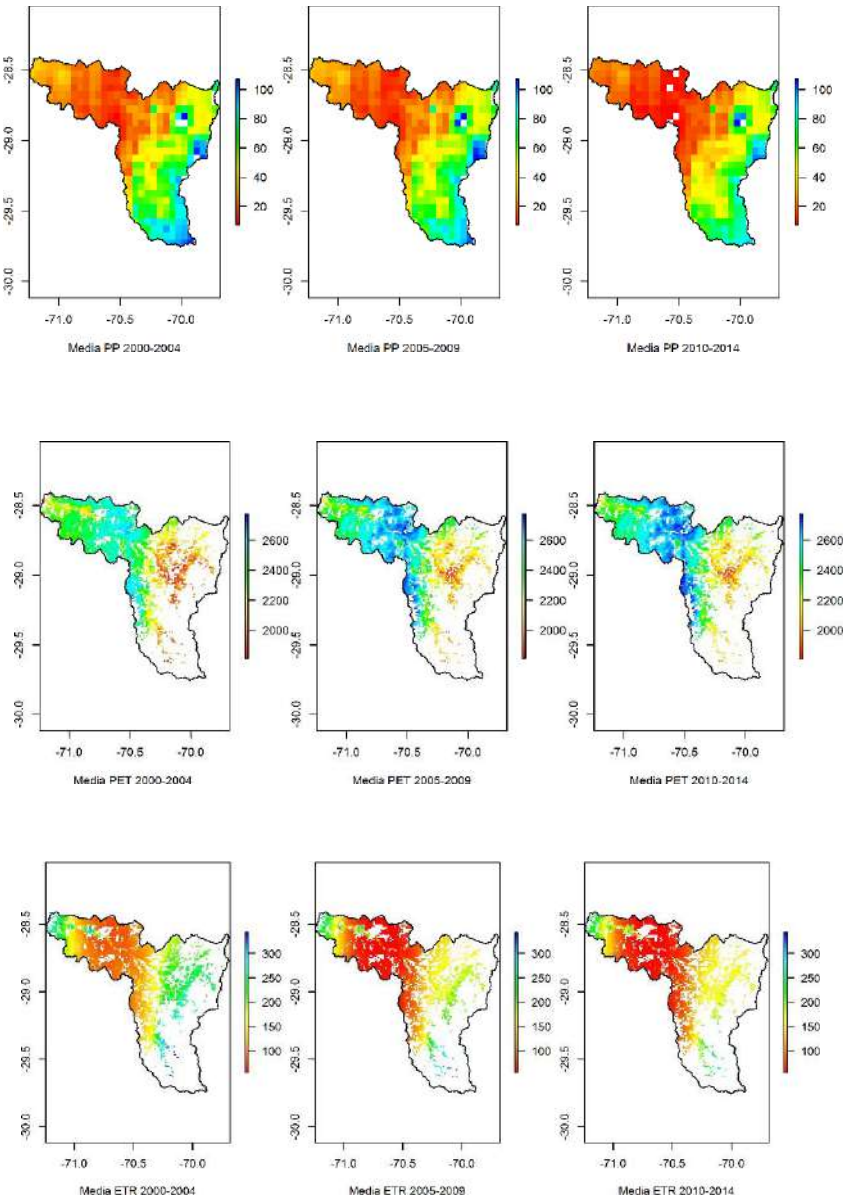


Figura 33. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

La cuenca presenta tendencias significativas para las 3 variables Pp, ETP y ETR (Figura 34). Para la pluviometría existe una tendencia al aumento de las Pp entre 0 y 20 mm para la zona cordillerana de la cuenca, mientras que el resto de la cuenca presenta una baja sostenida en particular en la zona oeste de la cuenca. La ETP presenta un aumento significativo en torno a los 50 mm situados en la zona baja de la cuenca, mientras que la ETR presenta una disminución del mismo orden en el mismo sector de la cuenca, a excepción de zonas de agricultura cercana al río donde no se ve tal disminución e incluso se identifica un aumento de la ETR. Esto hace suponer que el aumento de la demanda dado

por la ETP genera mayores necesidades de riego en estos sectores lo que impulsa un mayor uso de agua de riego subterránea, lo que debe compararse con los niveles de los pozos.

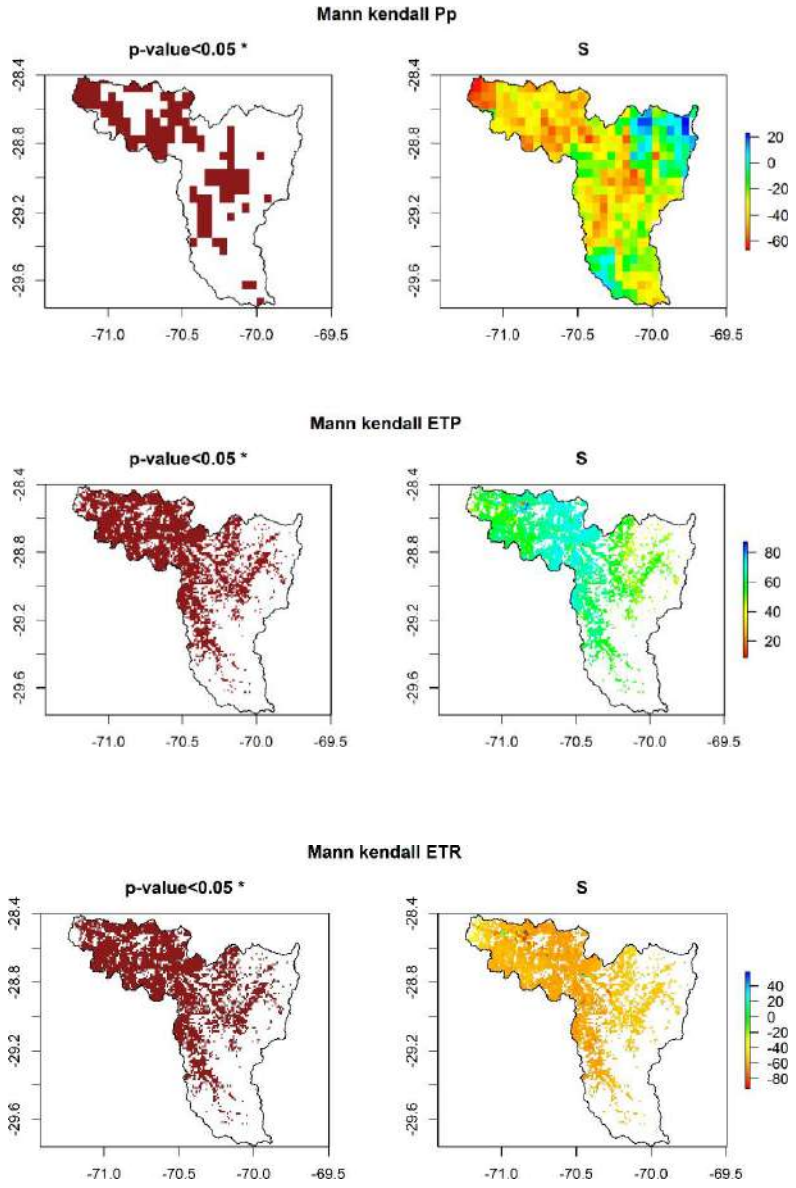


Figura 34. Figuras de anomalías anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca presenta 15 estaciones pluviométricas, concentradas en la zona baja de la cuenca (Figura 35). El registro permitió comparar cerca de 180 meses de comparación en todas las estaciones. Los valores de correlación son aceptables con valores que fluctúan entre 0,2 y 0,6, pero con un valor de KGE no adecuado siempre inferior a 0, lo que demuestra que existe un problema de sesgo y de en menor medida de precisión en las estimaciones de esta variable por lo que los resultados vinculados a la magnitud de la Pp deben tomarse con suma precaución, pero así de los de tendencia.

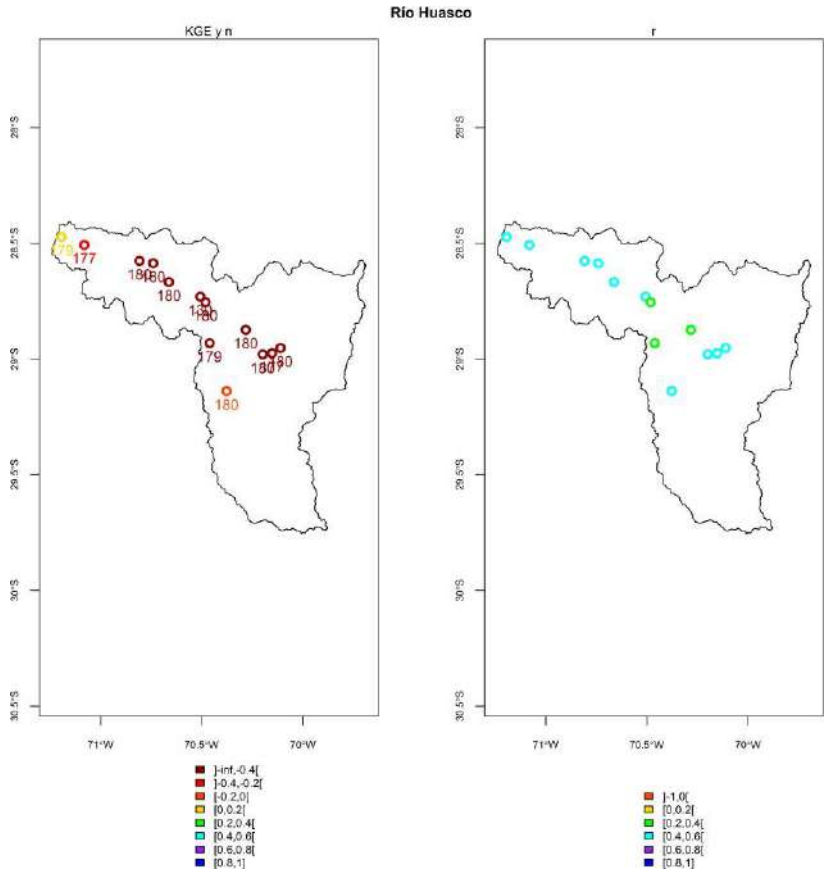


Figura 35. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta 5 estaciones meteorológicas las cuales se concentran en la zona baja de la cuenca (Figura 36). El registro permitió comparar entre 128 y 176 meses de observaciones satelitales con valores de correlación muy buenos (superiores a 0,8), y valores de KGE entre 0,4 y 1 lo que nos indica que las estimaciones satelitales de ETP son

adecuadas en la zona donde hay estaciones meteorológicas y sirven para evaluar magnitudes y tendencias.

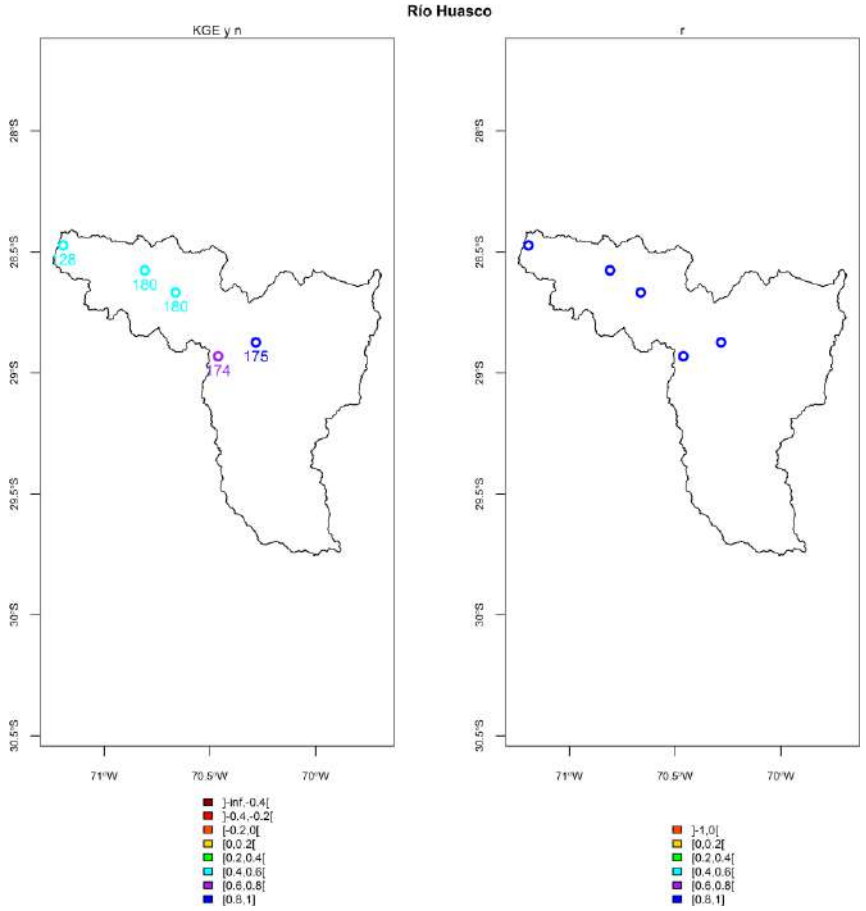


Figura 36. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

La cuenca presenta una tendencia generalizada a presentar un déficit hídrico, con dos periodos marcados (Figura 37), entre Julio 2008 y enero 2011 y aquel entre Julio 2012 y Diciembre 2014, siendo este segundo período aquel donde se presentan niveles de déficit mayores y más sostenidos en el tiempo. Se demuestra una recurrencia de la sequía propia de los ambientes desérticos, aunque el último periodo es más extenso en tiempo, logrando mantener una severidad cercana a la severa por 3 años. La cartografía de SPEI muestra valores de sequía severa en la zona baja del valle del Huasco, mientras que la sequía moderada se manifiesta con mayor fuerza en la zona central de la cuenca (Figura 37).

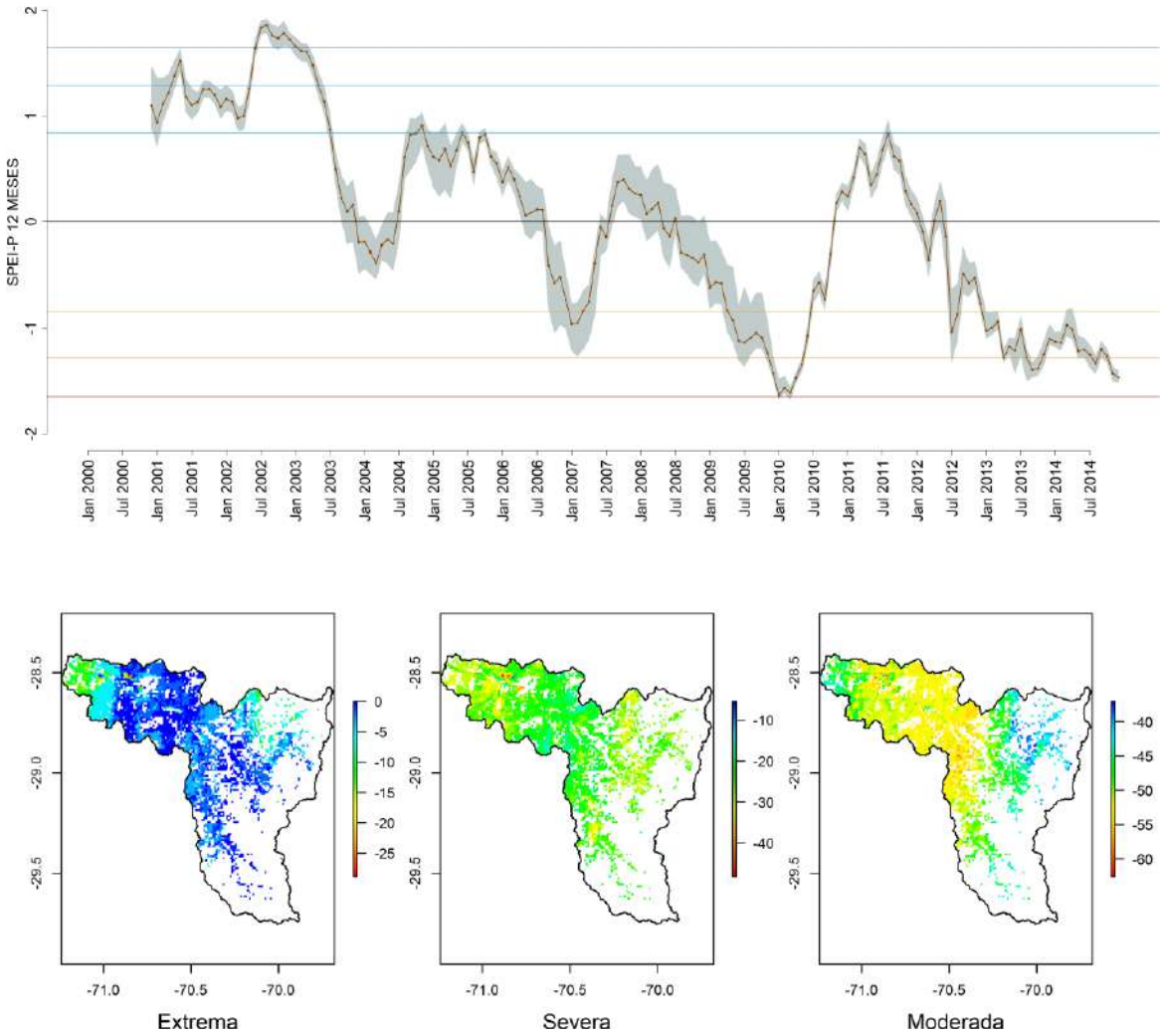


Figura 37. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta una situación sumamente importante de déficit hídrico producto de la declinación de las precipitaciones y el aumento de la ETP los cuales fueron significativos para el periodo de estudio. En esta condición se registra un descenso generalizado y significativo del consumo de agua (ETR) por parte de la vegetación nativa de la zona. En las zonas del valle central con riego se ve un aumento del consumo de agua, probablemente debido al aumento de la demanda atmosférica. La sequía se manifiesta con mayor intensidad en la zona media de la cuenca.

Región de Coquimbo

Las cuencas de la región presentan un déficit hídrico importante, con los valores de sequía moderada más importantes del país, siendo aquellos de sequía severa y extrema también notables en particular aquellos registrados en la cuenca costera 0406 que presenta los niveles de sequía extrema más grandes del país (Figura 38). Esta condición de sequía es propia a esta zona semiárida no obstante cabe destacar los mayores valores de sequía registrados en comparación a las cuencas situadas en el norte grande, lo que denota una tendencia a presentar un déficit hídrico más marcado en esta zona de transición con el desierto durante el periodo 2000-2014.

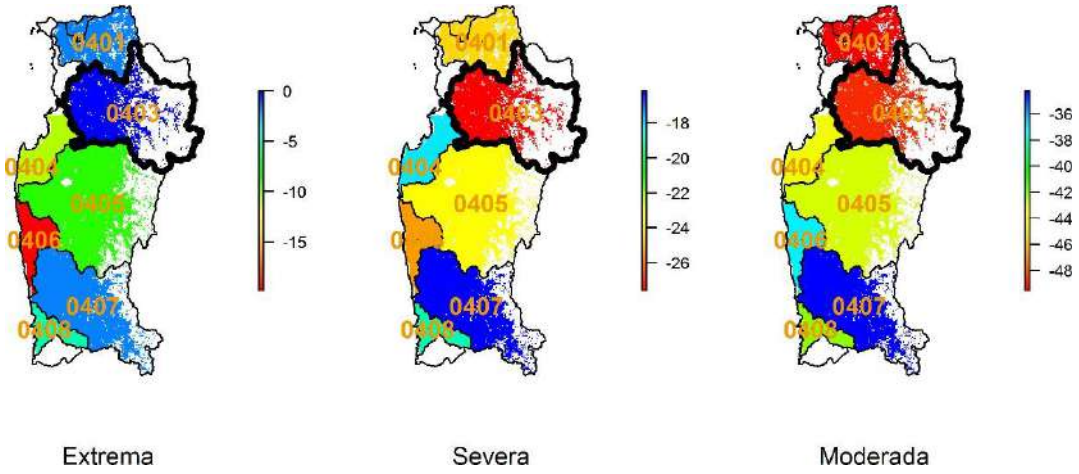


Figura 38: Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Coquimbo, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca Rio Elqui (cod. 0403)

Variaciones anuales

Las Variaciones anuales de la cuenca, muestran una clara tendencia hacia la disminución de las Pp, el aumento de la ETP y una disminución de la ETR (Figura 39). En particular destaca una continua baja precipitación registrada desde el año 2009 en adelante con valores en torno a los 50 mm en promedio. La ETP presenta una tendencia al alza importante con algunos años donde se destaca este fenómeno con mayor magnitud como son el año 2006, 2009 y desde 2012 hasta el 2014. Este efecto de aumento de la demanda tiene consecuencias en la proporción ETR/ETP (Kc) que disminuye durante todo el periodo y muy fuertemente desde el año 2012 en adelante, lo que se explica por un efecto de estrés en la vegetación que depende únicamente del agua superficial, afectando su crecimiento y desarrollo.

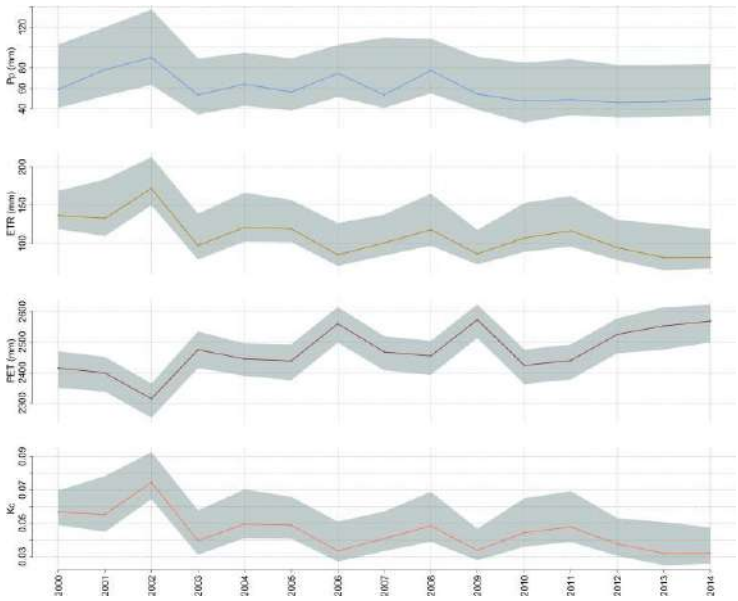


Figura 39. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

El análisis por quinquenios de la distribución espacial de las variables nos muestra que la cuenca es sumamente variable (Figura 40). Las Pp presentan una magnitud entre 50 y 100 mm en la mayoría de la cuenca a excepción de la zona sureste que presenta valores superiores a los 200 mm. Este patrón espacial se mantiene en el tiempo pero registrándose una disminución generalizada en el último quinquenio. Los datos de ETP presentan fuertes diferencias entre la zona oeste de la cuenca, la zona central y la zona este (cordillerana) que tiene valores menores. La tendencia temporal nos indica que los mayores cambios de ETP se dan en la zona central de la cuenca registrándose aumentos importantes en los valores de ETP durante el último quinquenio. La ETR presenta grandes variaciones espaciales destacándose cuatro sectores, la zona costera con mayores valores de ETR producto probablemente del aporte de las neblinas costeras, la zona central con bajos valores, la zona central en torno del rio Elqui, donde se concentra la agricultura, con altos valores de ETR y la zona cordillerana con altos valores de ETR producto de un mayor aporte pluvial. En general la tendencia es a la disminución de esta variable de consumo hídrico en todos los sectores durante los últimos quinquenios, a excepción de la zona agrícola del valle central que mantiene altos niveles de ETR gracias al riego.

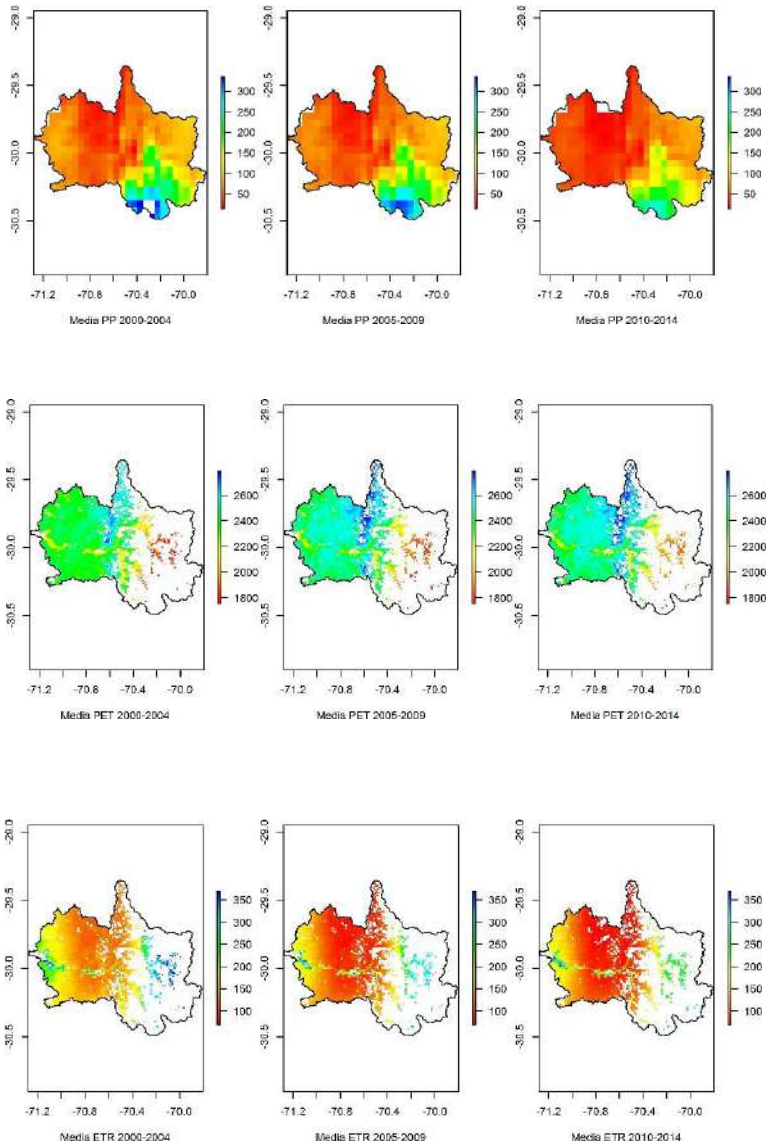


Figura 40. Cartografías de precipitación, ETR y ETP media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

Las tendencias espacio-temporales muestran una disminución significativa de la precipitación en gran parte de la cuenca (Figura 41), siendo la zona este de la cuenca y la suroeste la más afectada por este déficit, con valores que bordean los 50 mm para el periodo de estudio lo que es muy relevante para esta zona de escasas precipitaciones, en particular para la zona Este. La ETP presenta un aumento generalizado, siendo significativo en la zona central de la cuenca con valores que se acercan a los 60 mm de valor S de magnitud. Por otro lado la ETR presenta una baja significativa en prácticamente toda la cuenca, lo que responde a la falta de lluvia y al aumento de la ETP, siendo particularmente notable la disminución en la zona costera cercana al cauce del rio Elqui con valores bajo los 50 mm. Por otro lado también se registran valores positivos en algunas zonas acotadas

cercana la zona central del río Elqui, donde probablemente se habilitaron terrenos para agricultura bajo riego, y por el aumento del consumo hídrico de los cultivos existentes dado el importante aumento de la demanda (ETP) que registra esta zona de la cuenca.

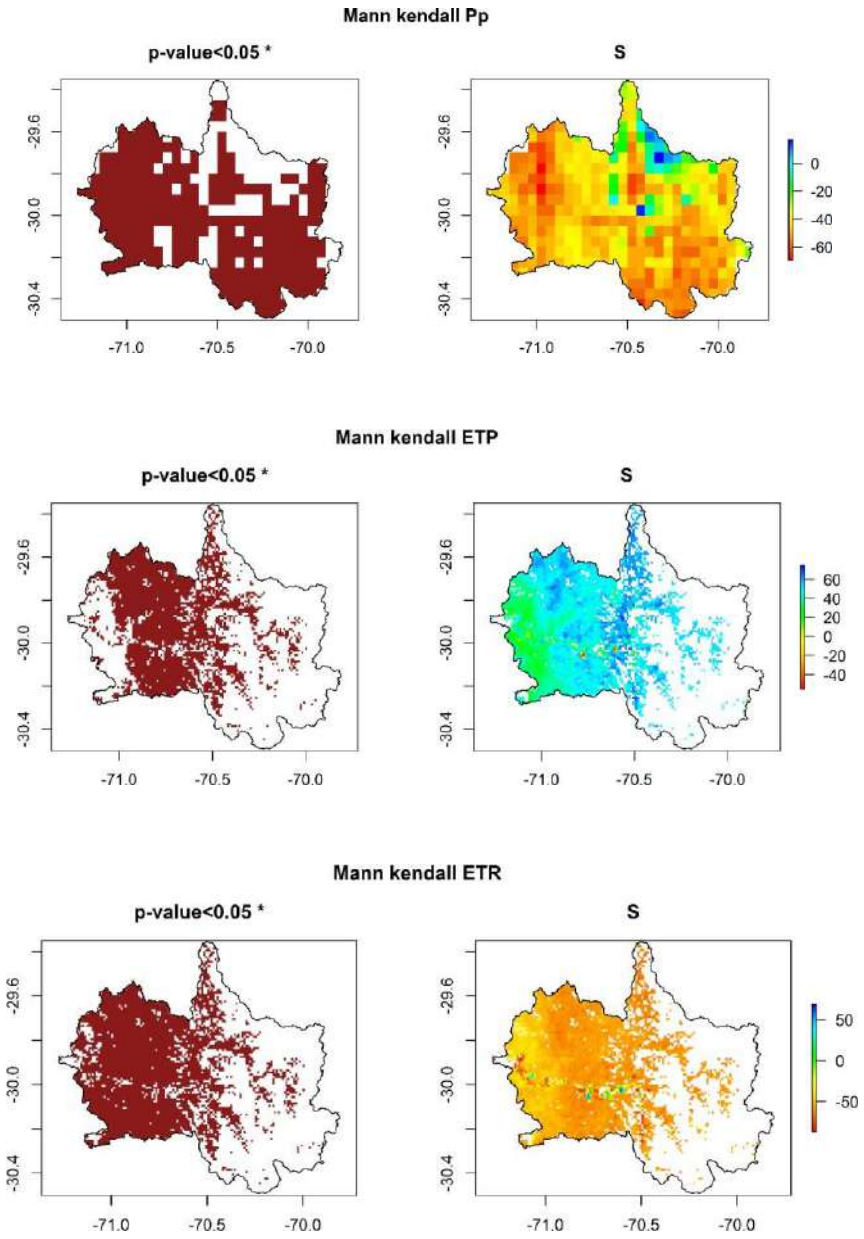


Figura 41. Figuras de Tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca presenta 14 estaciones pluviométricas las cuales están distribuidas en toda la cuenca (Figura 42). El registro permitió comparar entre prácticamente en todas las cuencas alrededor de 180 meses de observaciones satelitales con valores de correlación buenos a aceptables (entre 0,4 y 0,8), no obstante los valores de KGE son poco adecuados en la mitad de los casos demostrando una cierta inconsistencia entre ambos datos dados probablemente por un problema de sesgo. Habiendo diferencias tan importantes entre estaciones cercanas cabe la duda sobre la calidad de los datos de terreno en ese sector. Este presume tomar con precaución los análisis referidos a las magnitudes de las precipitaciones en la cuenca y no así a las tendencias, en particular las zonas este y oeste de la cuenca.

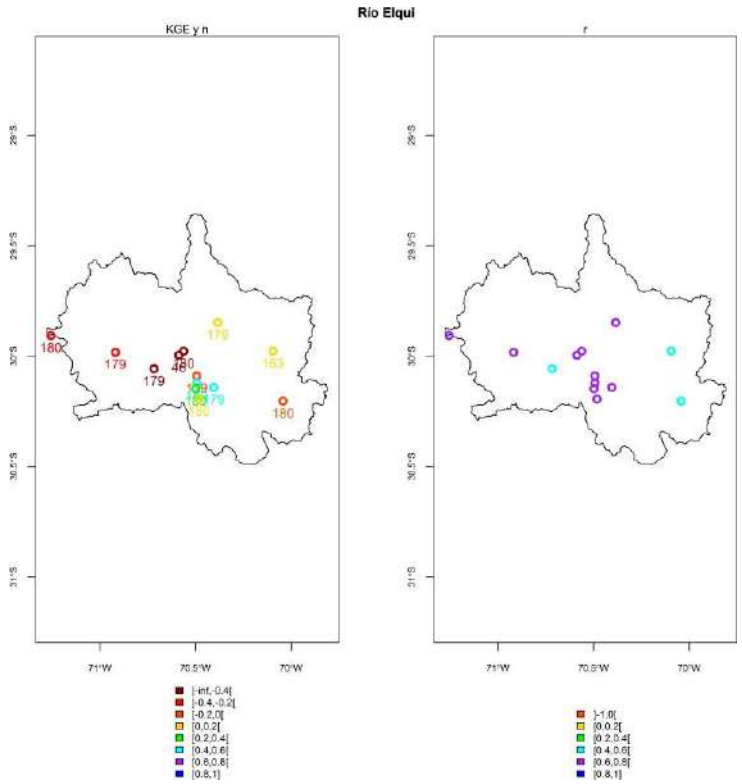


Figura 42. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta 2 estaciones meteorológicas las cuales se concentran en la zona centro sur de la cuenca (Figura 43). El registro permitió comparar entre 180 meses de observaciones satelitales con valores de correlación muy buenos (superiores a 0,8), y valores de KGE entre 0,6 y 0,8 lo que nos indica que las estimaciones satelitales de ETP son muy adecuadas en la zona donde hay estaciones meteorológicas.

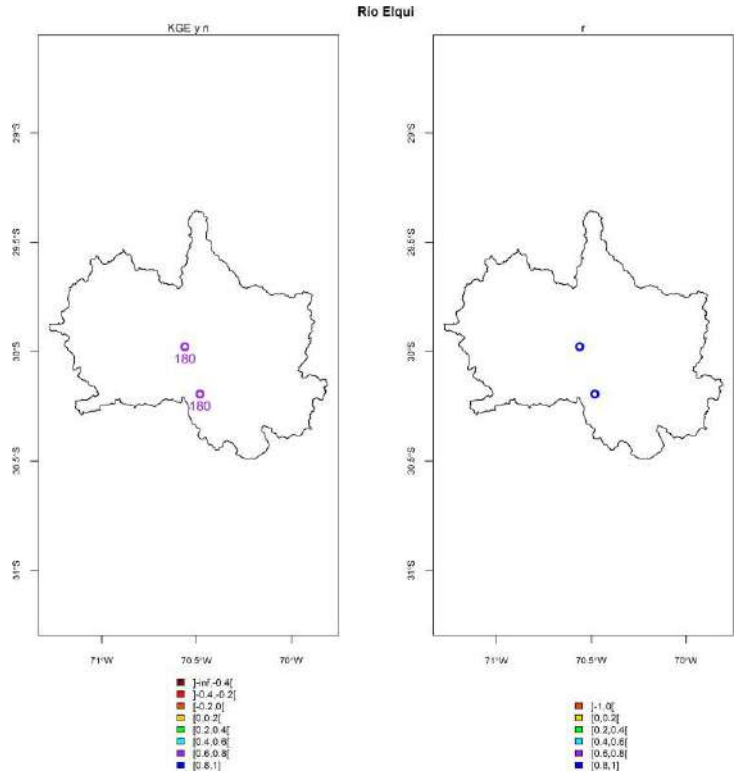


Figura 43. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

La cuenca presenta varios periodos de sequía siendo aquel descrito entre julio 2012 a diciembre 2014 el de mayor magnitud dado su intensidad y duración (Figura 44). Cabe destacar la magnitud extrema de la sequía en julio 2013 y julio 2014. El año 2007 y el 2010 también corresponden a años de sequía siendo particularmente extrema el año 2010, pero destacándose estos años periodos estivales sin lluvia. Con respecto a la distribución espacial del déficit hídrico, la cuenca se divide en una zona con una fuerte sequía severa hacia una franja al oeste de la cuenca donde se insertan las primeras elevaciones frente al océano, mientras que la zona interior hacia el este de esta, presenta los mayores valores de déficit moderado.

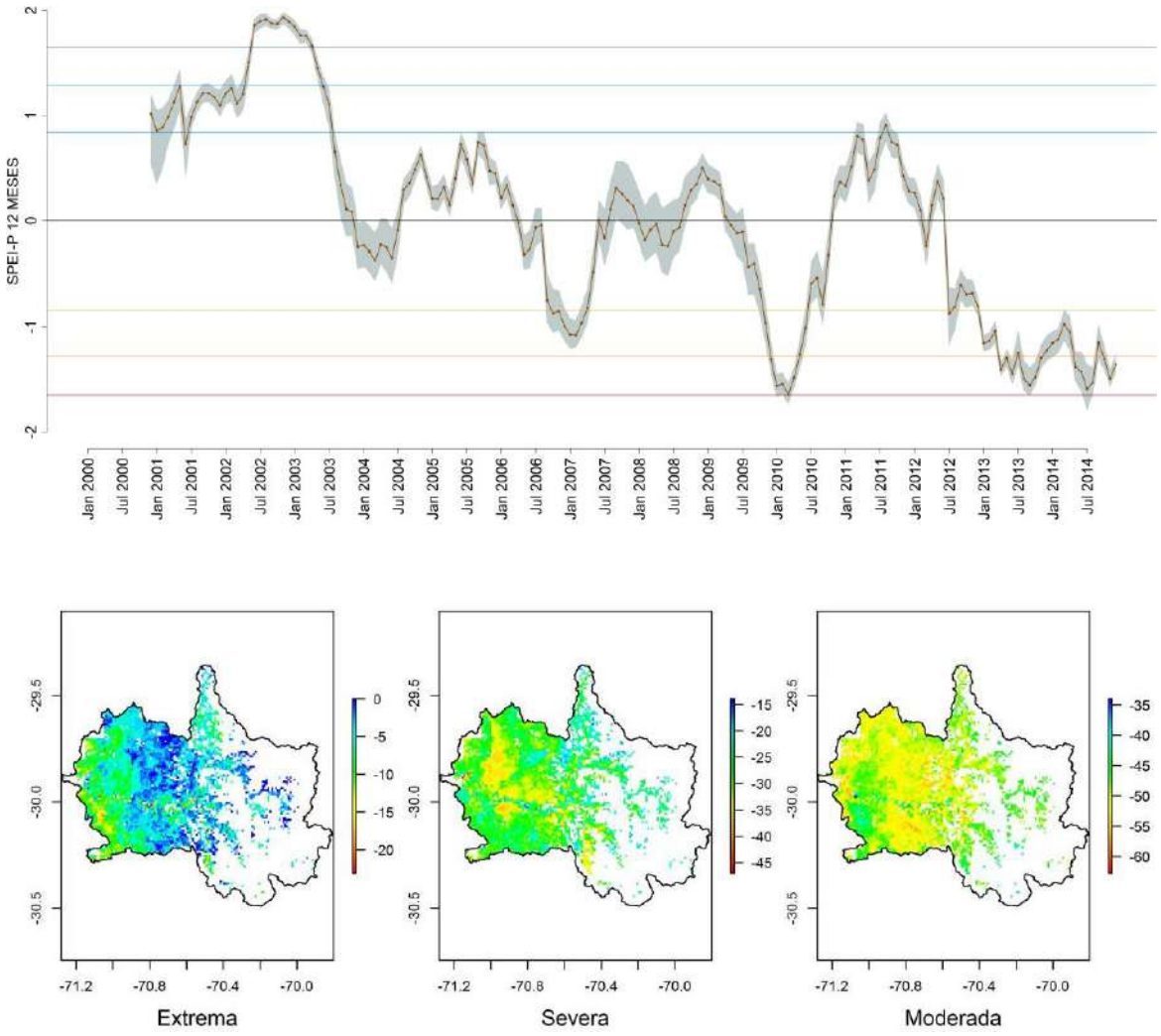


Figura 44. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta una situación marcada de sequía, la que se manifiesta en todo la superficie con un déficit significativo de precipitación y un aumento de la ETP a excepción de la franja costera. En los sectores del valle central, se registra aumento en el consumo de agua por parte de cultivos, lo que demuestra el aumento de la ETR registrada en ese sector. La vegetación del resto de la cuenca presenta importantes niveles de descenso en la ETR lo que permite inferir sobre el acentuado estrés hídrico al cual están sometidas y que tiene efecto sobre su crecimiento y desarrollo. Las zonas precordilleranas al este de la cuenca y la zona del valle cercano a la costa son los que presentan mayores magnitudes de déficit.

Región de Valparaíso

Las cuencas de la región han sufrido un déficit general inferior a las cuencas de las regiones más al norte ya descritas, en particular a lo que se refiere a déficit extremo y severo (Figura 45). En esta región se identifican las cuencas costeras entre río Aconcagua y río Maipo como aquellas con mayor déficit hídrico dado el criterio de magnitud moderada, aunque se destaca el nivel de sequía extrema que sufrió la cuenca costera 0505 correspondiente a la zona de San Antonio y alrededores. Se destaca que estas cuencas son cuencas que responden a regímenes pluviales siendo fuertemente condicionada por la variable de precipitación liquida que se reporta en este informe.

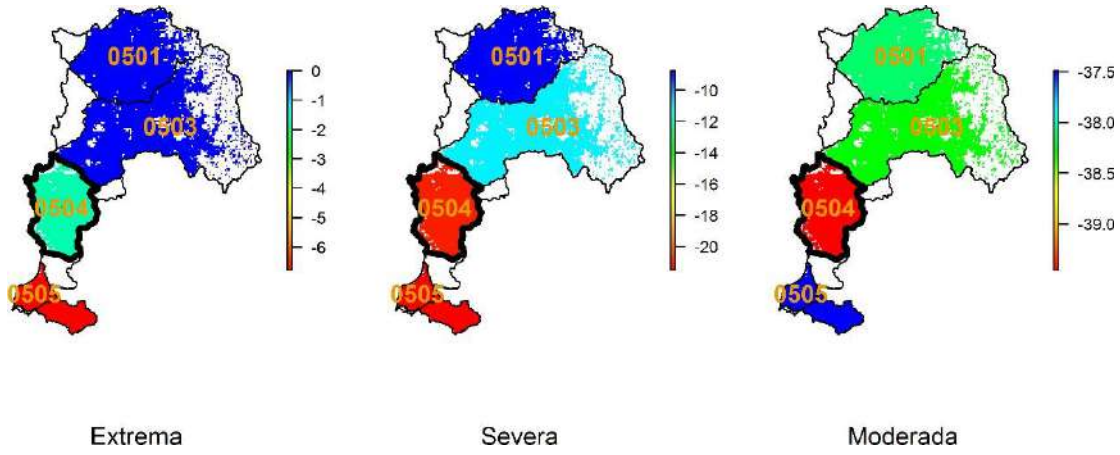


Figura 45. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Valparaíso, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca costera entre Rio Aconcagua y Rio Maipo Cuenca (cod. 0504)

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes Variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso constante que se acentúa desde el año 2007 y posteriormente se mantiene con niveles bajos cercanos a los 400 mm (Figura 46). La ETP presenta valores relativamente estables durante el periodo de estudio destacándose valores estables desde el año 2011 en adelante. La ETR también presenta valores bastante estables. Estos resultados implican que el déficit está regulado principalmente por la lluvia, siendo el consumo de agua sostenido al verse una ETR y un Kc constante en el tiempo, lo que supone el uso de otras fuentes de recursos hídricos para sostener estos niveles de ETR, entre los que podemos suponer las fuentes sub-superficiales y el aporte de canales que pueden provenir de cuencas vecinas principalmente.

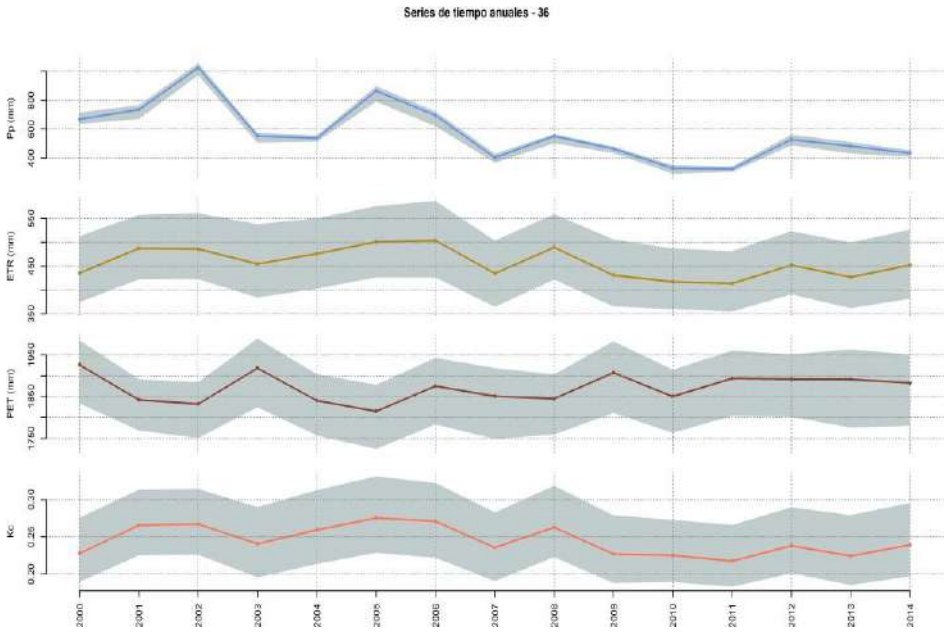


Figura 46. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Se observa la importante y generalizada disminución de la precipitación durante el último quinquenio, en cuanto a la ET, la potencial no varía mayormente en el tiempo, mientras que la real presenta valores sensiblemente más bajos (rojos) en la zona interior de la cuenca, presumiblemente en sectores de matorrales y bosque nativo (Figura 47).

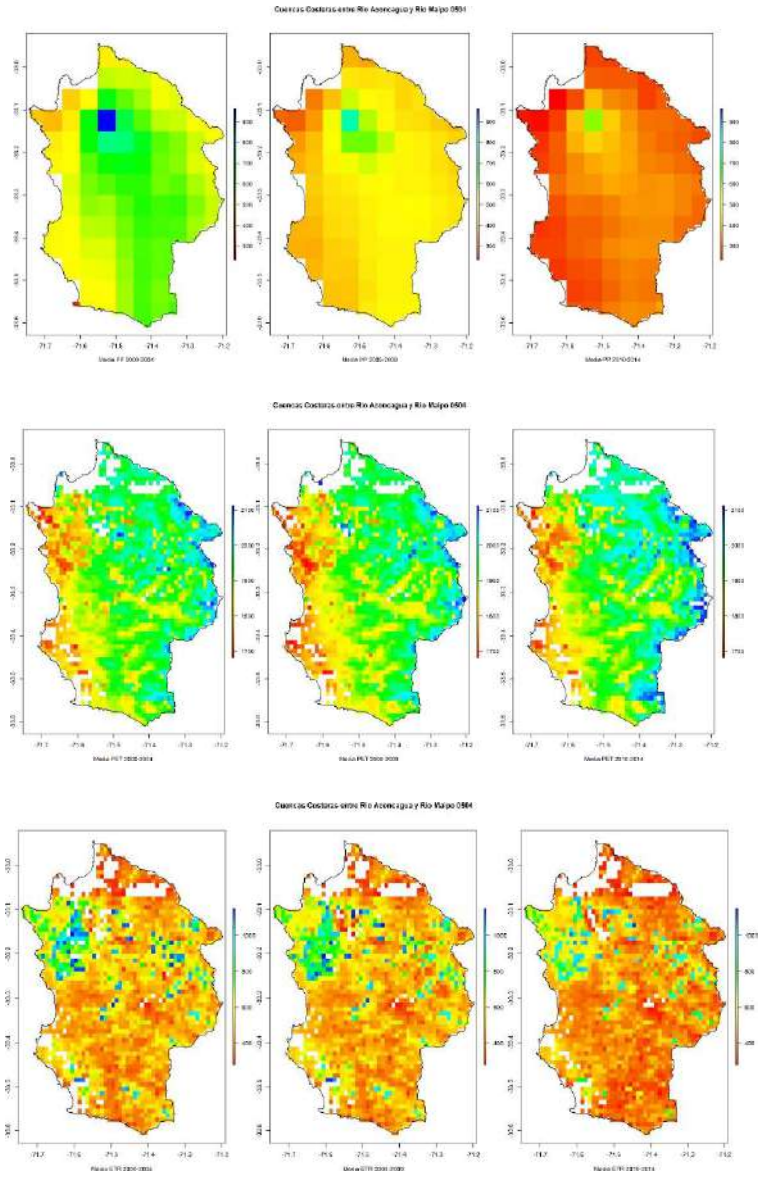


Figura 47. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis estadístico espacialmente explícito de tendencias muestra disminuciones siginficativas de la Pp en toda la cuenca (Figura 48), registrandose mayores tendencias en la zona norte de la cuenca y en la zona este, siempre con valores negativos de tendencia en torno a los 50 a 60 mm de valor S. La ETP muestra pocos valores significativos dentro de la cuenca, mientras que la ETR presenta una mayor disminución con valores significativos en gran parte de la cuenca en particular en sectores alejados de la costa, hacia la zona este de la cuenca donde se encuentran grandes extensiones de matorrales y bosques esclerofilos, los que presentan por ende una situacion de stress hidrico dado su menor ETR.

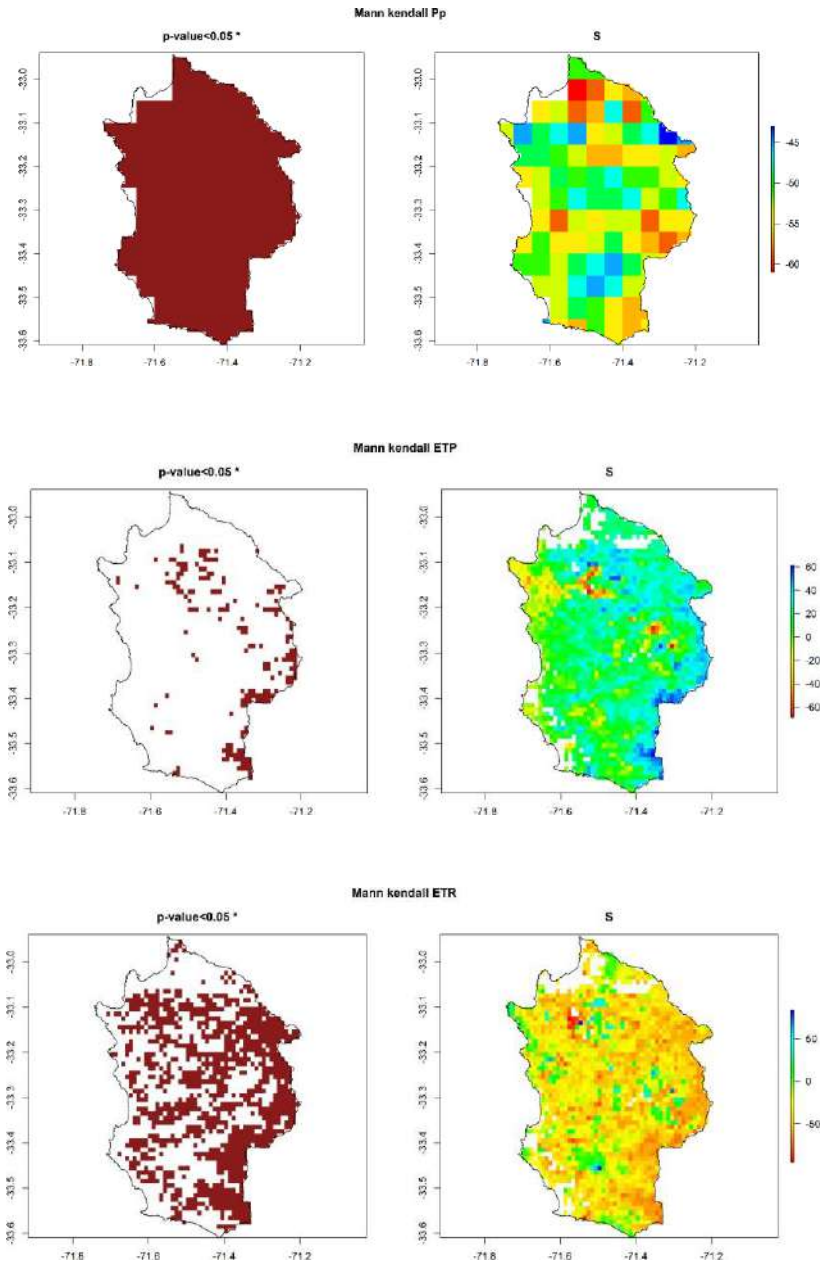


Figura 48. Figuras de Tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con 9 estaciones con datos pluviométricos bien representados en el espacio (Figura 49), con una serie temporal superior a los 150 meses a excepción de 3 estaciones costeras donde existen menos de 20 meses de comparación. Todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,8 lo que habla de una precisión de las estimaciones presentando algunos valores de sesgo en el sector costero, puesto que el índice KGE no es adecuado en 3 de las 5 estaciones costeras. El resto de las estaciones presenta valores aceptables a muy buenos de exactitud entre las observaciones de terreno y las satelitales.

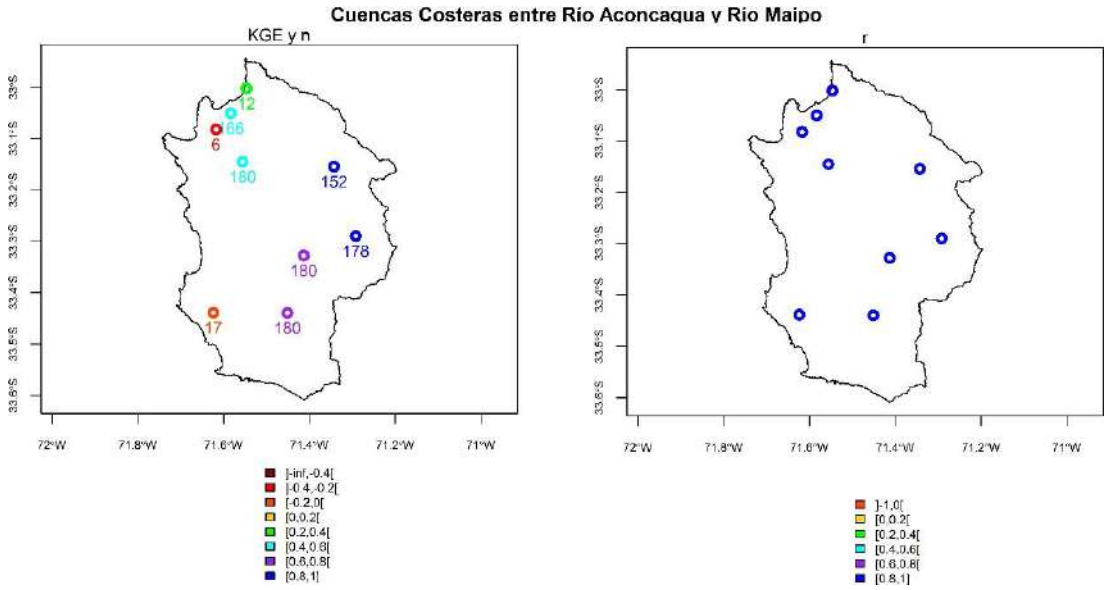


Figura 49. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

En esta cuenca solo se encuentra una estación con datos de ETP la cual presenta buenos valores de ajuste entre el producto satelital MOD16 y los datos de ETP obtenidas de la estación meteorológica considerando 177 meses de comparación representado por el n (Figura 50). En la misma figura se aprecia que el valor de correlación (r) es superior a 0,8 mostrando una buena precisión de los datos estando el valor de KGE entre 0,4 y 0,6 lo que se considera aceptable, demostrando pocos problemas de sesgo. Esto nos permite concluir una adecuada precisión del producto satelital evaluado en una estación.

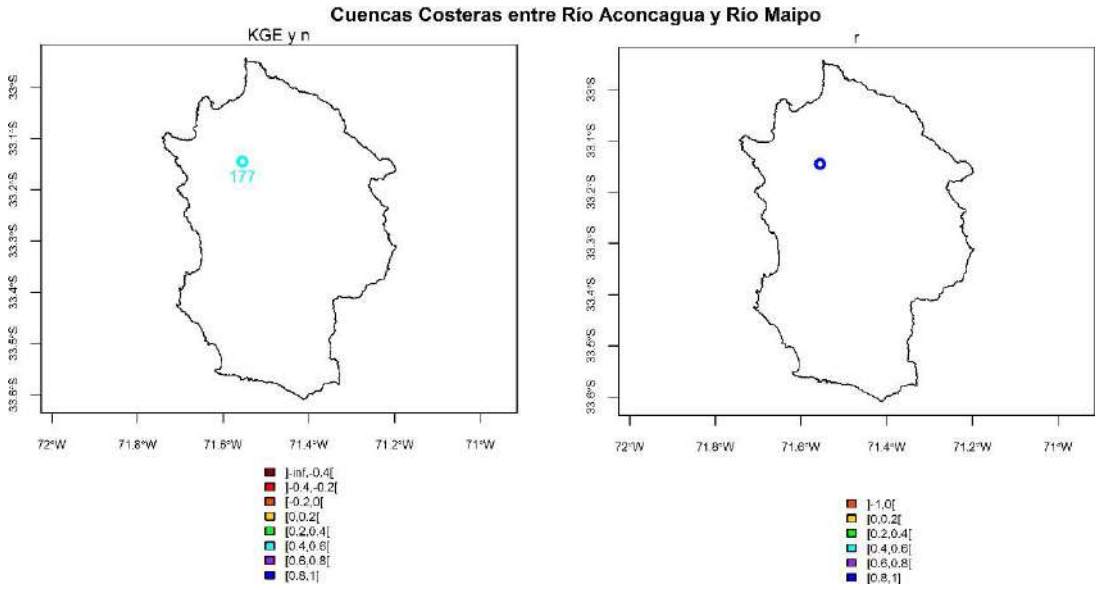


Figura 50. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores negativos desde el 2009 en adelante (Figura 51), pero con un periodo de recuperación entre otoño 2012 y el otoño 2014. Otro aspecto a destacar es que la intensidad de la sequía supera el umbral de moderada durante el periodo de otoño 2010 al otoño 2012 alcanzando un valor de magnitud acumulada de - 39.46 (Figura 45), y durante largos periodos de tiempo umbrales de severa e incluso extrema en el otoño 2011. La principal causa atribuible a esta sequia es la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa dentro de toda la cuenca, siendo la ETP poco influyente en este caso. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra mayores valores de sequía severa en la zona costera de la cuenca, mientras que en términos de sequía moderada es la zona al sur de la bahía de Valparaíso y algunos valles interiores los que presentan los mayores valores de sequía, siendo en esto caso la zona costera menos afectada.

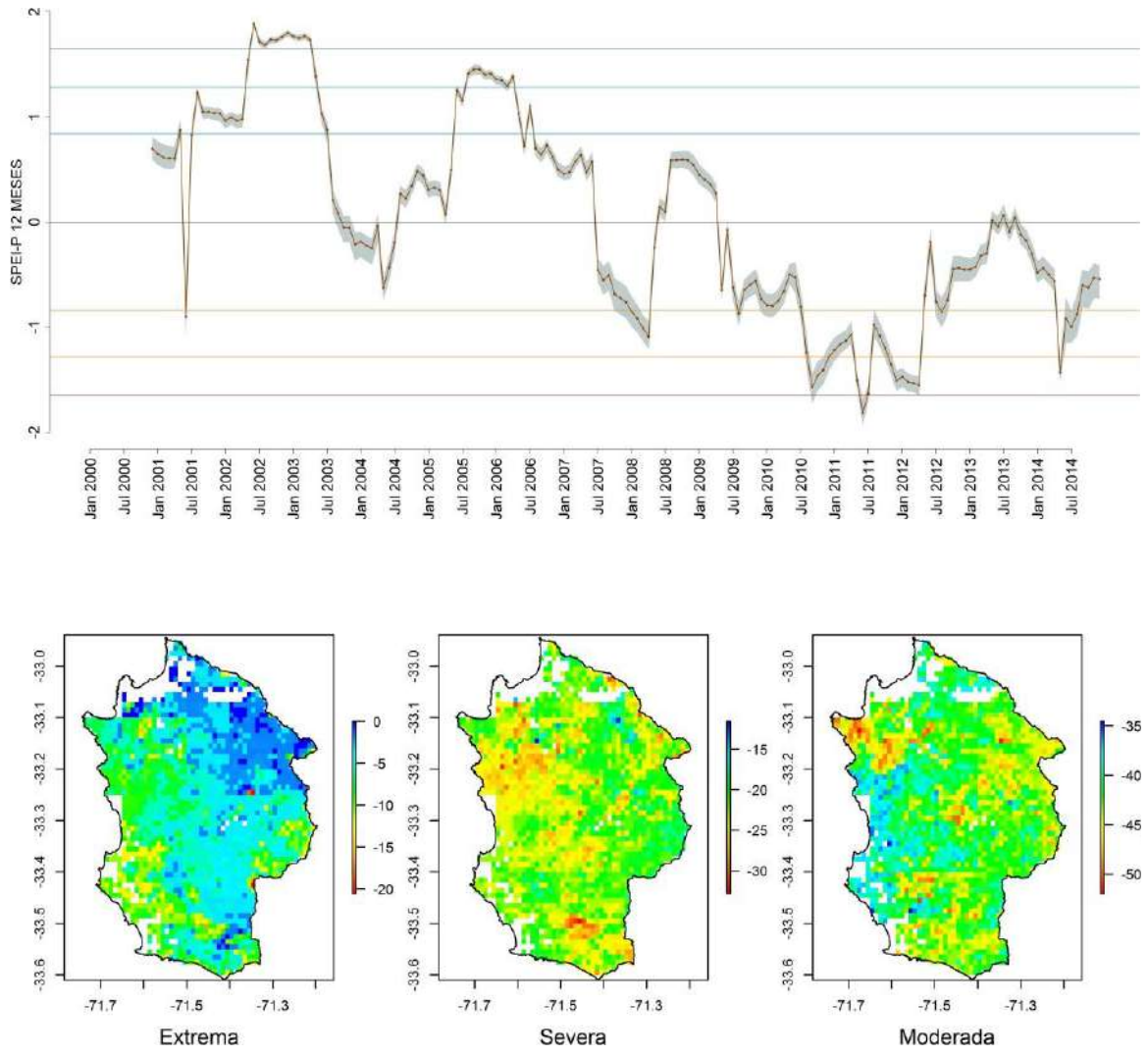


Figura 51. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta un marcado déficit hídrico debido principalmente a la declinación de las precipitaciones las cuales han disminuido de forma significativa en esta cuenca puesto que La ETP no presenta tendencias claras de cambio. La cuenca acusa una fuerte y significativa tendencia a la baja de la ETR demostrando el estrés hídrico experimentado por la vegetación nativa la cual ve afectado su crecimiento y desarrollo, por otra parte se registran ciertos sectores con aumento o mantención de la ETR durante el periodo lo que podría darse en valles con agricultura de riego. Se destaca la distribución heterogénea de la sequía la que podría obedecer a patrones micro climáticos locales.

Región Metropolitana

La región solo presenta dos cuencas afectadas por un déficit diferente entre ambas cuencas (Figura 52), siendo las cuencas costeras entre el río Aconcagua y Maipo las más afectadas, presumiblemente dado el régimen pluvial que posee a diferencia de la cuenca del rio Maipo que depende en gran parte de la acumulación de nieve que se da en los altos relieves de la zona que superan los 4000 m en muchos sectores. Se destaca la baja proporción de sequias extremas a diferencias de las cuencas ubicadas más al norte.

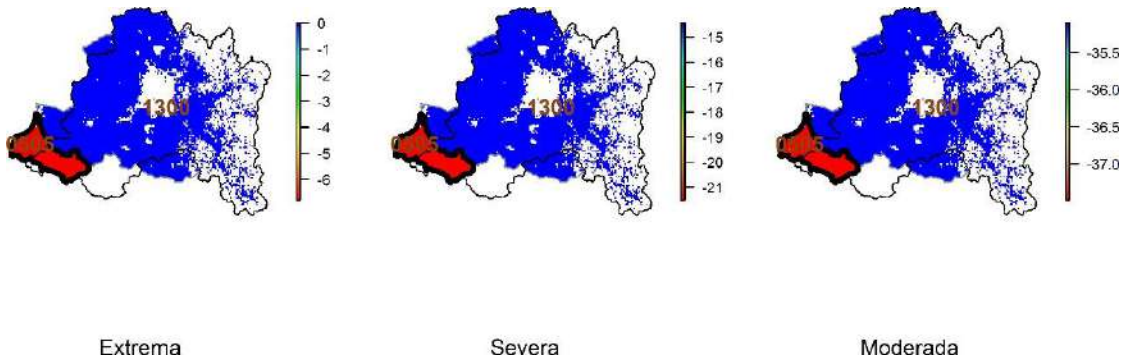


Figura 52. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región Metropolitana, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la cuenca costera entre río Aconcagua y río Maipo

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso constante que se acentúa desde el año 2006 y posteriormente se mantiene con niveles bajos cercanos a los 400 mm (Figura 53). La ETP presenta valores relativamente estables durante el periodo de estudio destacándose valores estables desde el año 2011 en adelante. La ETR también presenta valores bastante estables aunque levemente inferiores desde el 2009 al 2014. Estos resultados implican que el déficit está regulado principalmente por la lluvia, siendo el consumo de agua sostenido al verse una ETR y un Kc constante en el tiempo, lo que supone el uso de otras fuentes de recursos hídricos para sostener los niveles de ETR, entre los que podemos suponer las fuentes sub-superficiales principalmente.

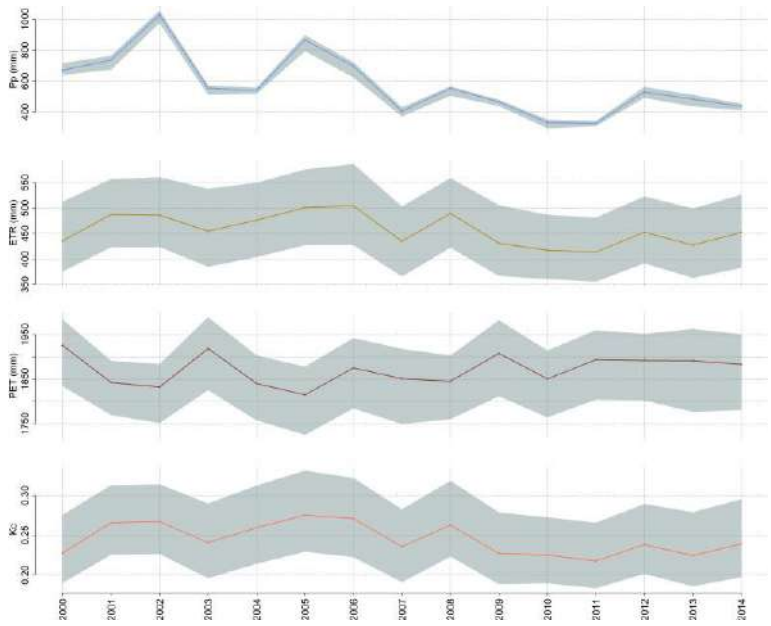


Figura 53. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un gradiente en las Pp de este a oeste siendo mayores al sureste e inferiores al noroeste (Figura 54). Se ve una marcada disminución de las precipitaciones en las cuencas en particular durante el último quinquenio. La ETP presenta tres zonas con valores que se incrementan de oeste a este, pero no se presentan mayores variaciones entre quinquenios. La ETR presenta valores más elevados en la zona costera presumiendo un aporte de agua suplementario a la Pp presumiblemente por neblinas, y se denota una leve disminución particularmente en este sector así como en la zona central de las cuencas durante el último quinquenio.

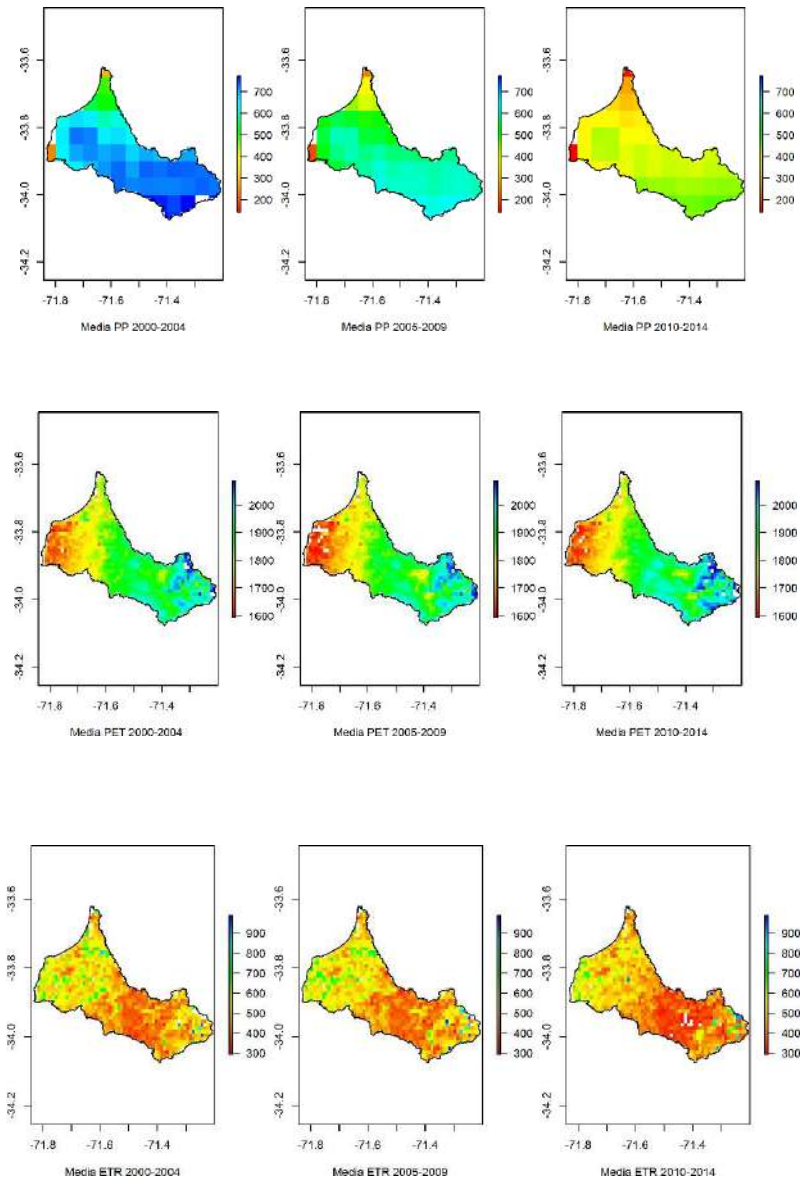


Figura 54. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de Tendencias muestra disminuciones siginficativas de la Pp en toda las cuencas (Figura 55), con valores negativos de tendencia en torno a los 55 a 60 mm de valor S. La ETP muestra pocos valores significativos de cambio dentro de la cuenca registrandose aumentos en zonas elevadas de la cuenca, mientras que la ETR presenta una mayor disminución con valores significativos en el sector este de las cuencas en particular en sectores donde se encuentran grandes extensiones de matorrales y bosques esclerofilos, los que presentan por ende una situacion de stress hidrico dado su menor ETR. Las zonas

costeras ocupadas en su mayoría por plantaciones forestales de eucaliptus presentan un leve aumento de la ETR el cual no es significativo.

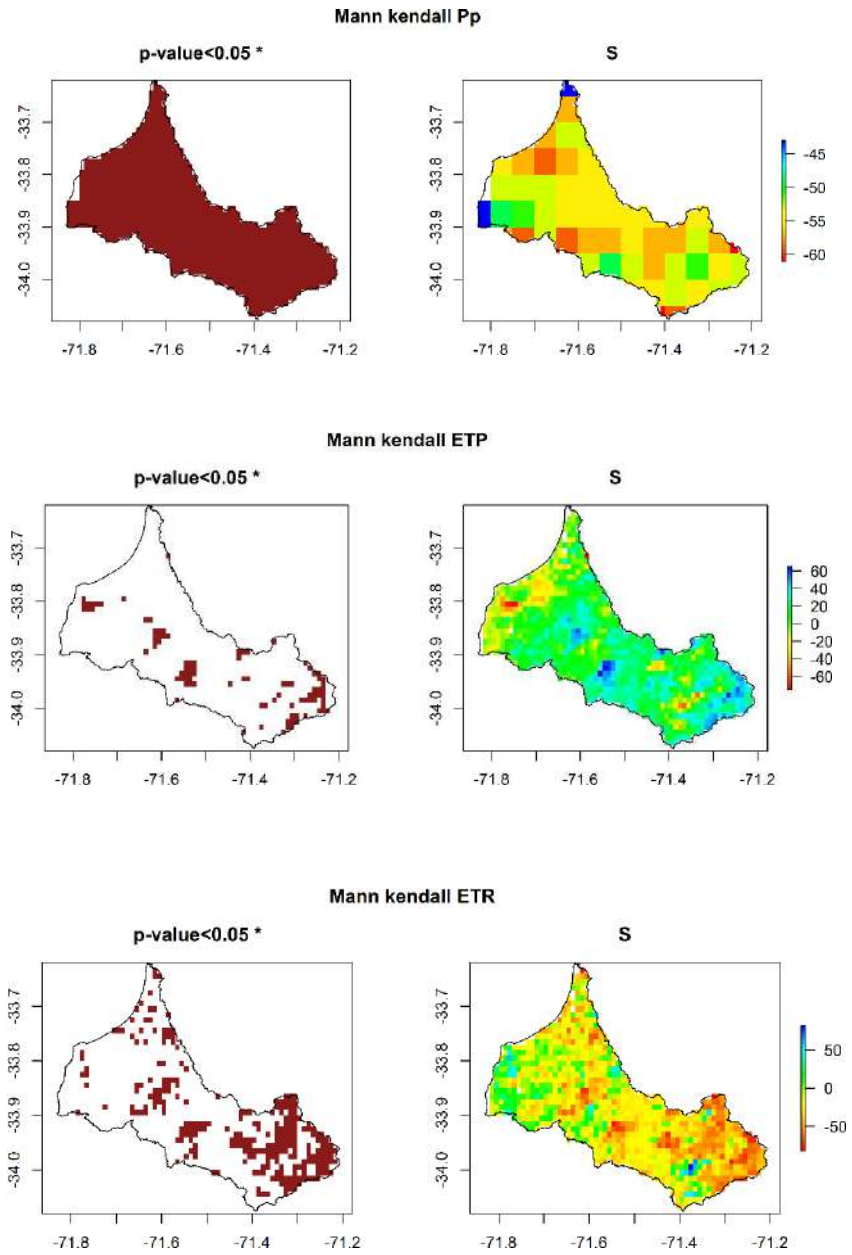


Figura 55. Figuras de Tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con 2 estaciones con datos pluviométricos (Figura 56), con una serie temporal en torno a los 180 meses de comparación. Todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,8 lo que habla de una excelente precisión de las estimaciones y presentando bajos valores de sesgo puesto que el índice KGE es siempre superior a 0,4. Esto permite inferir que los valores satelital de pluviometría son correctos para evaluar tendencias y magnitudes.

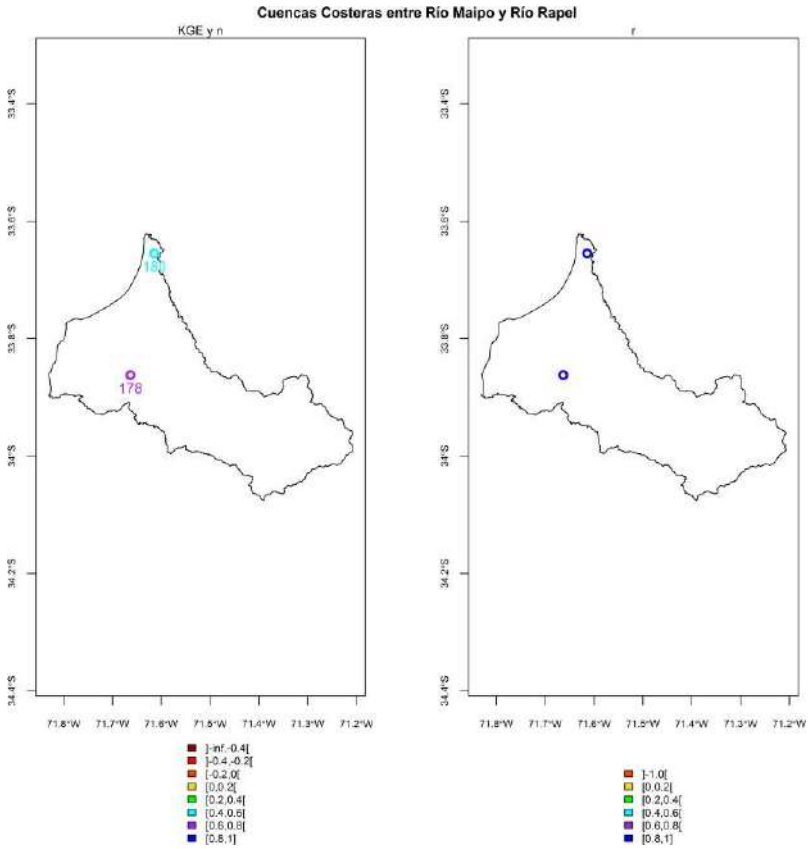


Figura 56. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

Las cuencas solo cuentan con una estación con datos de ETP la cual presenta buenos valores de ajuste entre el producto satelital y los datos de ETP obtenidas de la estación meteorológica considerando 179 meses de comparación (Figura 57). El valor de correlación (r) es superior a 0,8 mostrando una buena precisión de los datos, y el valor de KGE entre 0,2 y 0,4 lo que se considera bajo, demostrando algunos leves problemas de sesgo. Esto

nos permite concluir una adecuada precisión del producto satelital de ETP evaluado en una estación, en particular para evaluar tendencias.

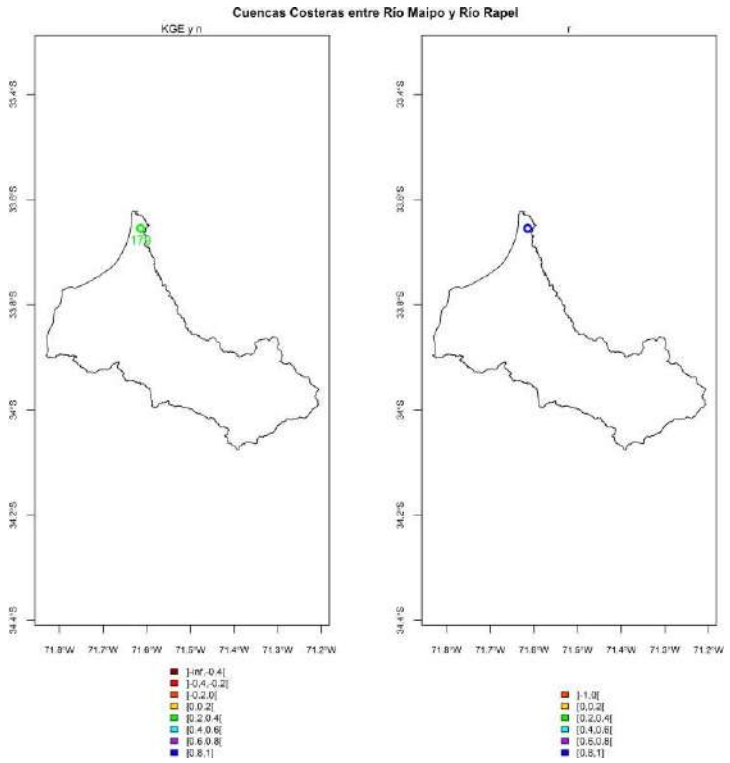


Figura 57. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores de sequía moderada desde el otoño 2009 al otoño 2012 pero con un periodo de recuperación entre esa fecha al verano 2014 (Figura 58). Otro aspecto a destacar es que la intensidad de la sequía supera el umbral de severa durante el periodo de primavera 2010, invierno 2011 y primavera 2011 al otoño 2012 alcanzando valores extremos en el otoño 2011. La principal causa atribuible a esta sequia es la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa dentro de toda la cuenca, siendo la ETP poco influyente en este caso. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra valores más elevados de sequía severa en la zona costera de la cuenca, mientras que si consideramos el criterio de sequía moderada es la zona interior la que presenta mayores valores de déficit.

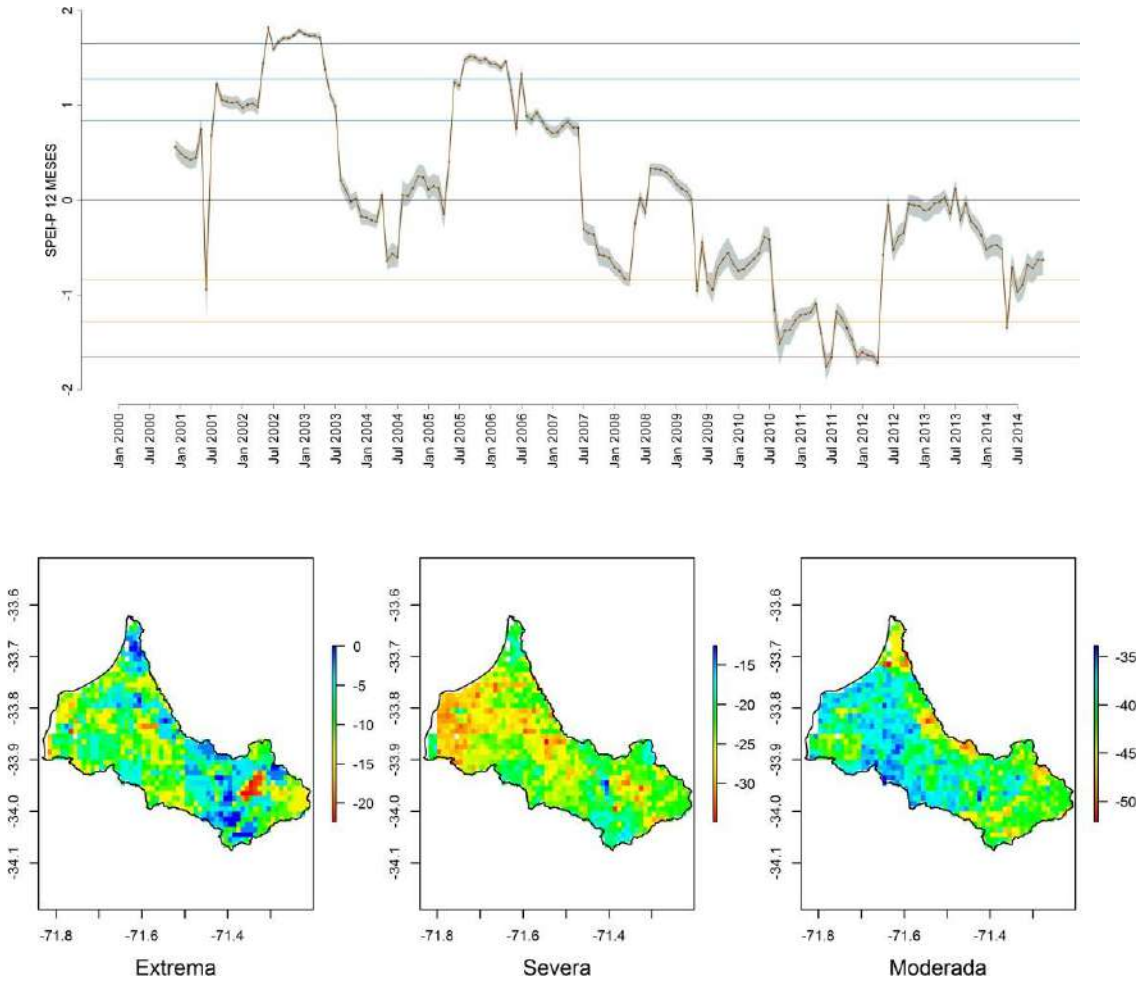


Figura 58. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca un marcado déficit hídrico, el cual es debido principalmente a la declinación de las precipitaciones la cual ha sido significativa durante el periodo de estudio y no se registra mayores modificaciones de la demanda atmosférica. La zona oeste cercana a la costa de la cuenca registra un menor efecto de sequía acumulada a diferencia de la zona interior que registra un desecamiento significativo de la ETR dado por una menor actividad de la vegetación presente en ese sector.

Región de O'Higgins

La región presenta dos cuencas evaluadas (Figura 59), siendo seleccionada la cuenca del río Rapel por presentar datos validación de los productos satelitales. Sin embargo se destaca nuevamente el mayor nivel de sequía de la cuenca costera la cual no fue evaluada en detalle por falta de datos *in situ*. Se destaca que la región presenta mayormente sequias de tipo moderada a diferencia de las cuencas localizadas en las regiones del norte que presentaban sequias extremas en muchos casos.

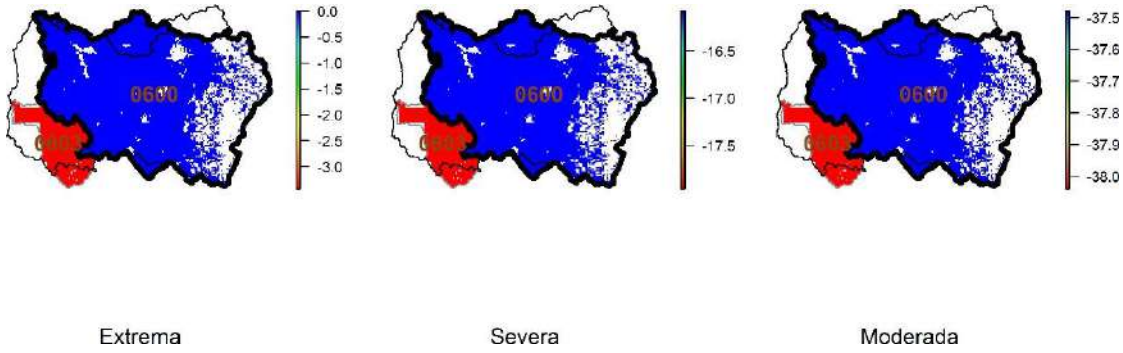


Figura 59: Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de O'Higgins, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la cuenca río Rapel (cod. 0600).

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso constante que se acentúa desde el año 2006 y posteriormente se mantiene con niveles bajos apenas sobre los 500 mm (Figura 60). La ETP presenta valores relativamente estables durante el periodo de estudio pero con un leve incremento desde el año 2010 al 2014. La ETR también presenta valores bastante estables aunque levemente inferiores desde el 2009 al 2014. Estos resultados implican que el déficit está regulado principalmente por la lluvia, siendo el consumo de agua levemente inferior a escala de cuenca al verse una ETR y un Kc con poco descenso en el tiempo, lo que supone el uso de otras fuentes de recursos hídricos para sostener los niveles de ETR, entre los que podemos suponer las fuentes sub-superficiales principalmente.

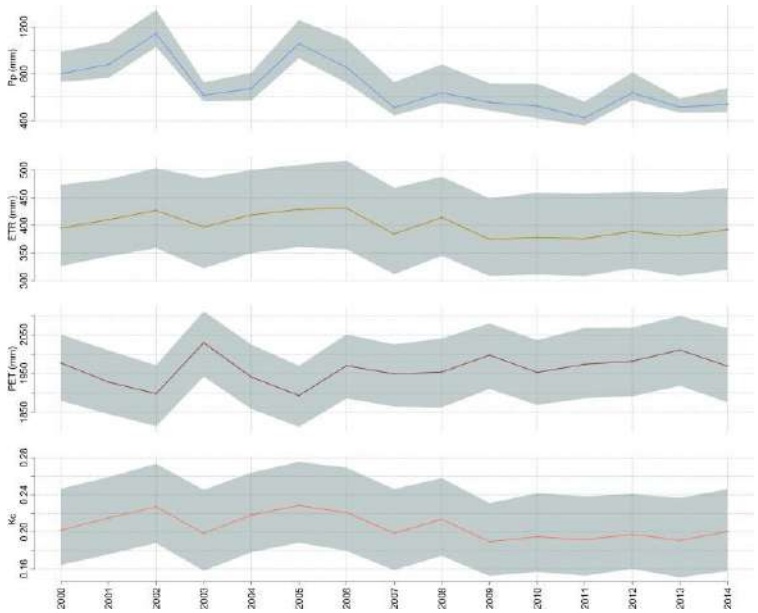


Figura 60. Tendencias a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un gradiente en las Pp de este a oeste siendo mayores al sureste e inferiores al noroeste con diferencias de magnitud importantes entre los 400 y los 1500 mm anuales (Figura 61). Se ve una marcada disminución de las precipitaciones en las cuencas en particular durante el último quinquenio. La ETP presenta 3 zonas con valores que se incrementan de oeste a este, pero no se presentan mayores variaciones entre quinquenios. La ETR presenta valores bajos en la zona costera y en la zona precordillerana, y se denota una leve disminución particularmente en este último sector durante el último quinquenio. La zona central presenta valores elevados de ETR presumiblemente al localizarse el área de agricultura de riego en esa zona.

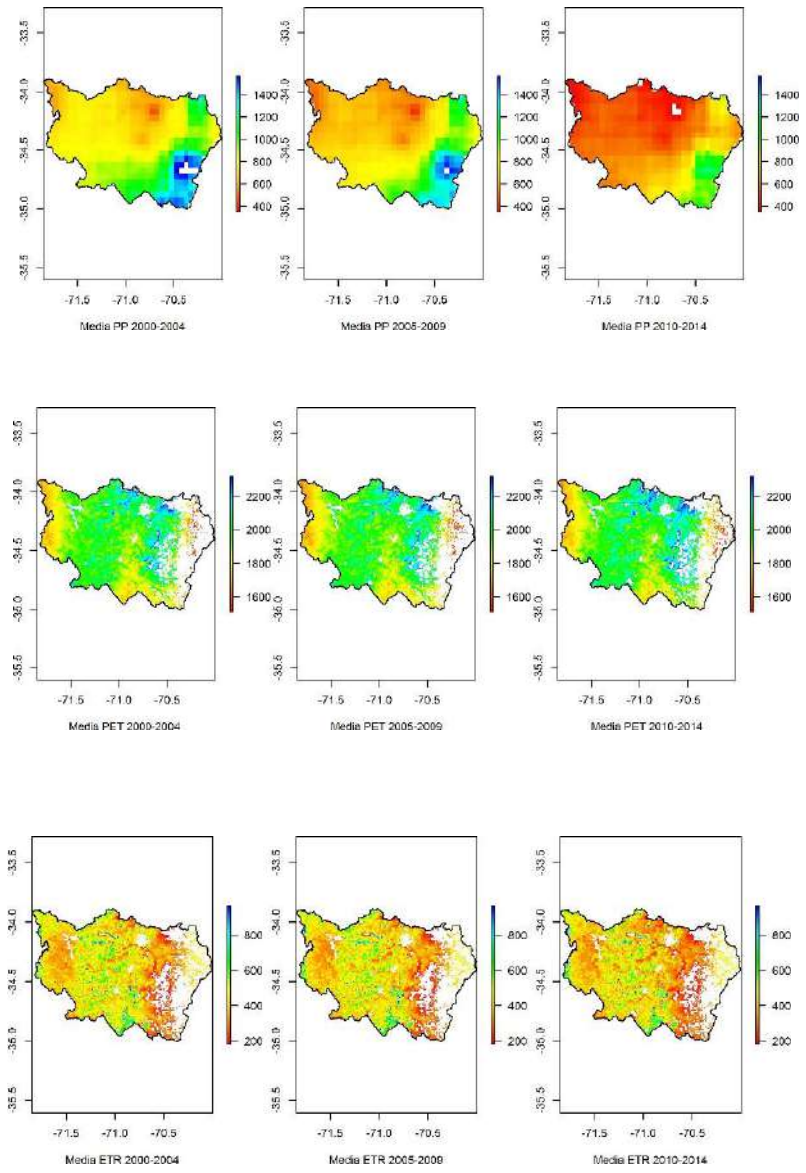


Figura 61. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de Tendencias muestra disminuciones significativas de la Pp en toda la cuenca (Figura 62), con valores negativos de tendencia en torno a los 50 a 65 mm de valor S. La ETP muestra pocos valores significativos de cambio dentro de la cuenca registrandose aumentos en la zona centro norte de la cuenca donde ubican algunos cordones montañosos, mientras que la ETR presenta una mayor disminución de valores significativos en los mismos sectores pero en zonas ampliadas mas debajo de los cordones montañosos en particular en sectores donde se encuentran grandes extensiones de matorrales y bosques esclerofilos, los que presentan por ende una situacion de stress hidrico dado su

menor ETR. Las zonas cercanas a la costa de la cuenca ocupadas en su mayoría por plantaciones forestales de eucaliptus presentan un leve aumento a la ETR el cual es significativo en algunos sectores.

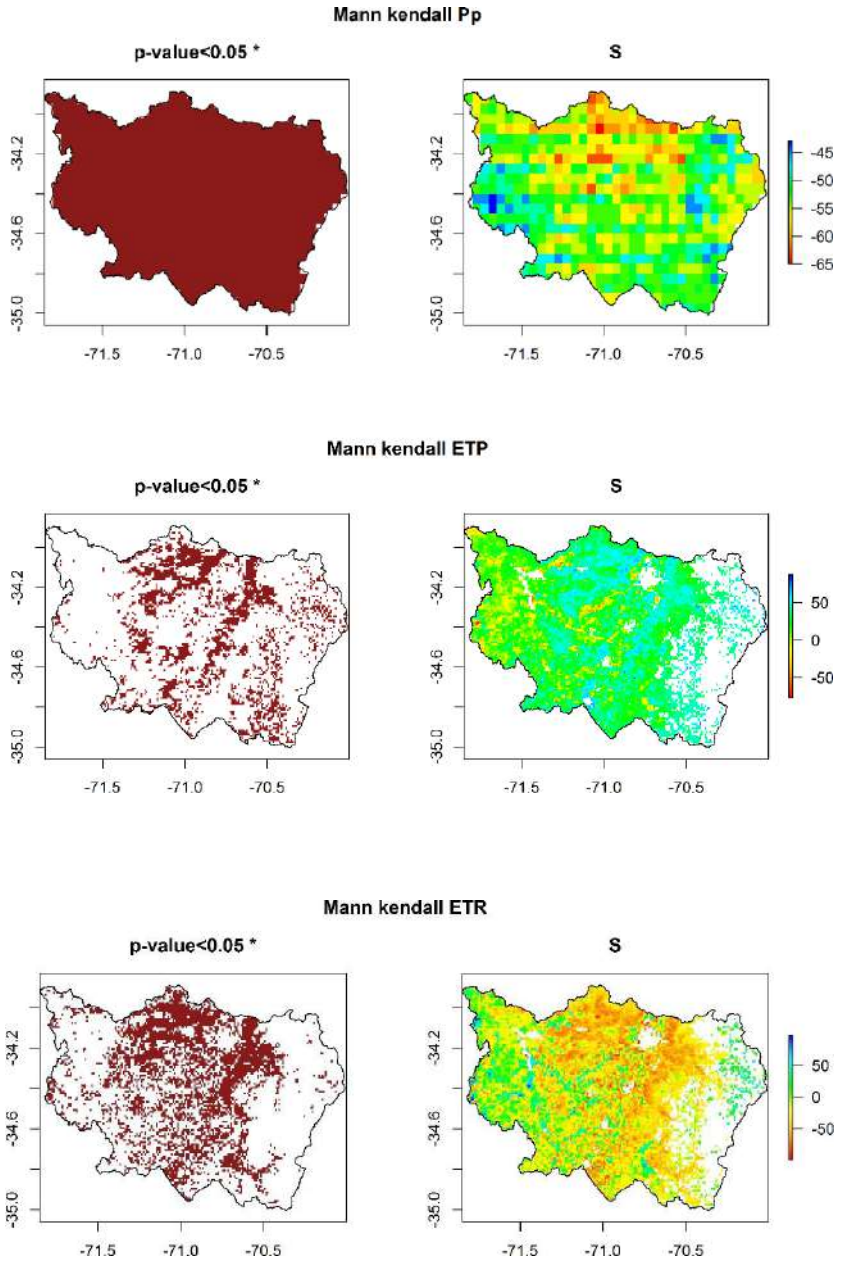


Figura 62. Figuras de Tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con numerosas estaciones con datos pluviométricos, con una serie temporal variable pero con la mayoría de sus estaciones con más de 180 meses de comparación. Prácticamente, todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,8 (a excepción de dos estaciones, y una de ellas con solo 17 datos) lo que habla de una excelente precisión de las estimaciones (Figura 63). Los valores de KGE se sitúan en su gran mayoría entre 0,6 y 1 lo que demuestra una buena exactitud de las estimaciones satelitales. Esto permite inferir que los valores satelital de pluviometría son adecuados para evaluar tendencias y magnitudes y además en este caso presentan un elevado número de estaciones bien distribuidas en la cuenca.

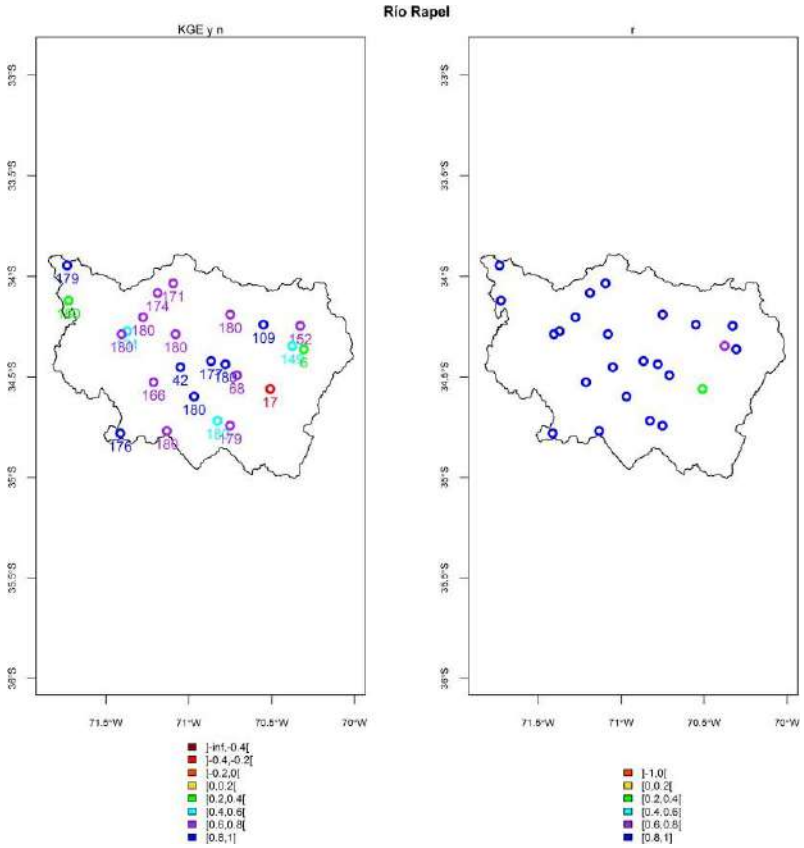


Figura 63. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca cuenta con dos estaciones con datos de ETP la cual presenta buenos valores de ajuste entre el producto satelital y los datos de ETP obtenidas de la estación meteorológica considerando 145 y 36 meses de comparación por estación (Figura 64). El valor de correlación (r) es superior a 0,8 mostrando una buena precisión de los datos, y el

valor de KGE entre 0,2 y 0,8 en particular para la estación con más datos lo que se considera bueno. Esto nos permite concluir una adecuada precisión y exactitud del producto satelital de ETP evaluado en una estación, lo que es adecuado para evaluar tendencias y magnitudes.

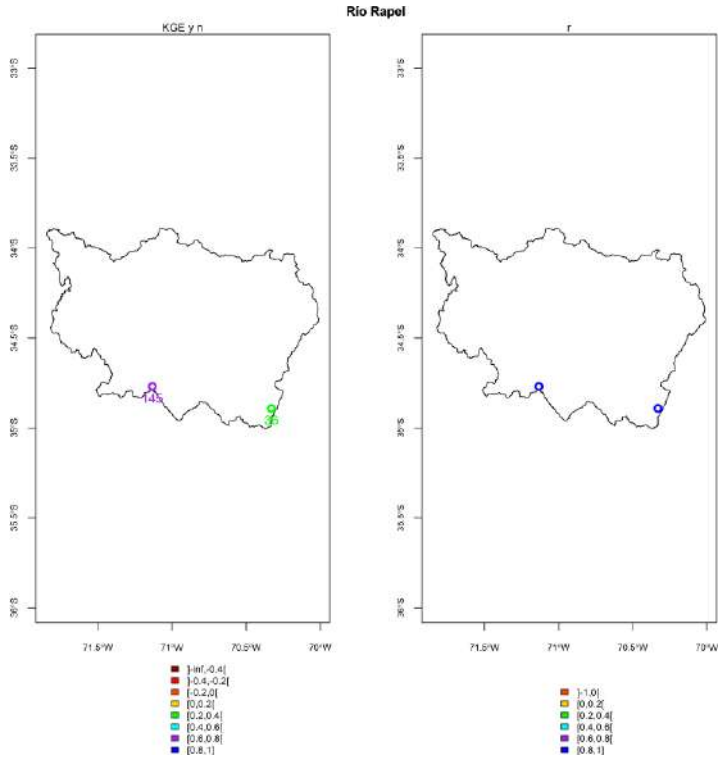


Figura 64. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores de sequía moderada desde el otoño 2009 a la primavera 2009, desde el otoño 2011 al otoño 2012, y desde la primavera 2013 a la primavera 2014 (Figura 65). Otro aspecto a destacar es que la intensidad de la sequía supera el umbral de severa durante el periodo de otoño 2011, al otoño 2012. La principal causa atribuible a esta sequia es la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa dentro de toda la cuenca, siendo la ETP poco influyente en este caso aunque se destaca zona montañosa norte de la cuenca la que presenta significativos aumentos de la ETP además del descenso en sus Pp. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra una tendencia generalizada de déficit, la cual se manifiesta de forma severa con mayor fuerza en la zona costera y en el valle central, mientras que la sequía moderada se expresa mayormente en la precordillera.

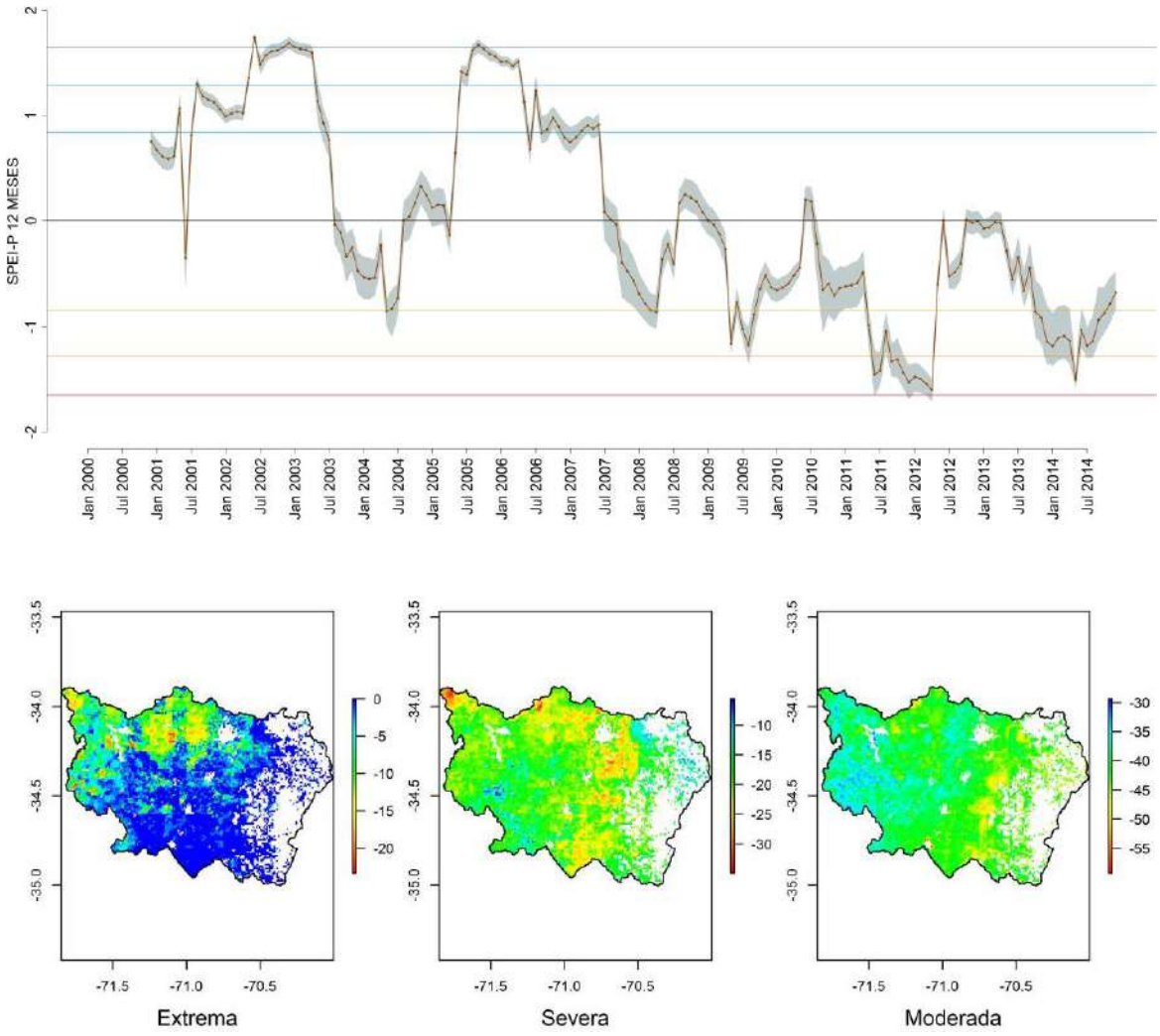


Figura 65. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta un importante déficit hídrico el cual se debe a la baja generalizada de la precipitación la cual ha sido significativa, y en parte al aumento de la ETP en algunos sectores de la cuenca en particular en zonas montañosas y lomajes de la zona centro y precordillerana de la cuenca. Esto genera una marcada disminución de la ETR en estas zonas y en otras en el centro de la cuenca donde la vegetación está siendo fuertemente por un estrés hídrico. Cabe señalar que el valle central también presenta sectores con aumento de la ETR probablemente debido a la agricultura de riego. La zona costera presenta un patrón neutro donde se observa pocos cambios en la ETP, lo que se observa también en la ETR.

Región del Maule

La región se caracteriza por presentar cuencas sin déficit extremos, pero con niveles de déficit moderados muy elevados en comparación con el resto del país (Figura 66). En este caso se selecciona la cuenca del Maule por presentar los niveles más elevados de sequía, pese a ser una cuenca que no solo depende de regímenes pluviales, como fue reportado en las regiones centrales.

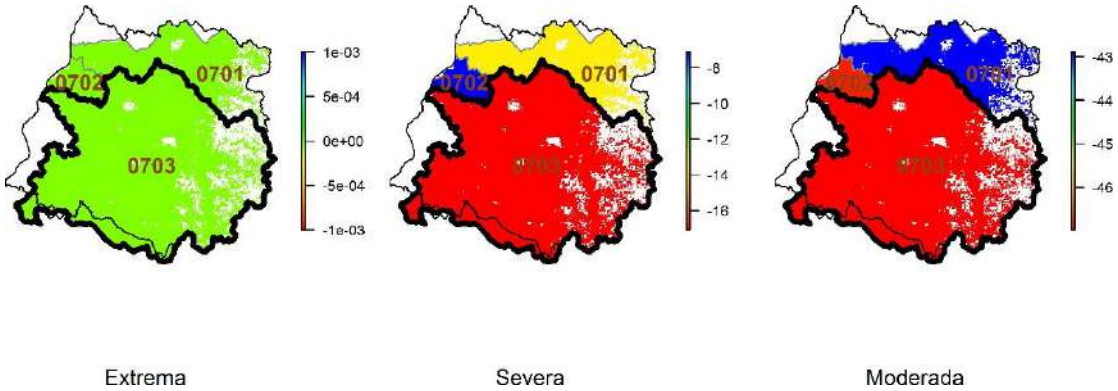


Figura 66. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región del Maule, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca Rio Maule.

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso constante que se acentúa desde el año 2006 y posteriormente se mantiene con niveles bajos apenas sobre los 750 mm anuales (Figura 67). La ETP presenta una tendencia al aumento durante el periodo de estudio con valores estables del año 2008 al 2014. La ETR también presenta valores bastante estables aunque se destaca una gran dispersión de las observaciones dadas por las diferentes coberturas de suelo. Estos resultados implican que el déficit está regulado mayoritariamente por el déficit de lluvia aunque el aumento de la demanda dado por la ETP también ejerce un efecto a considerar.

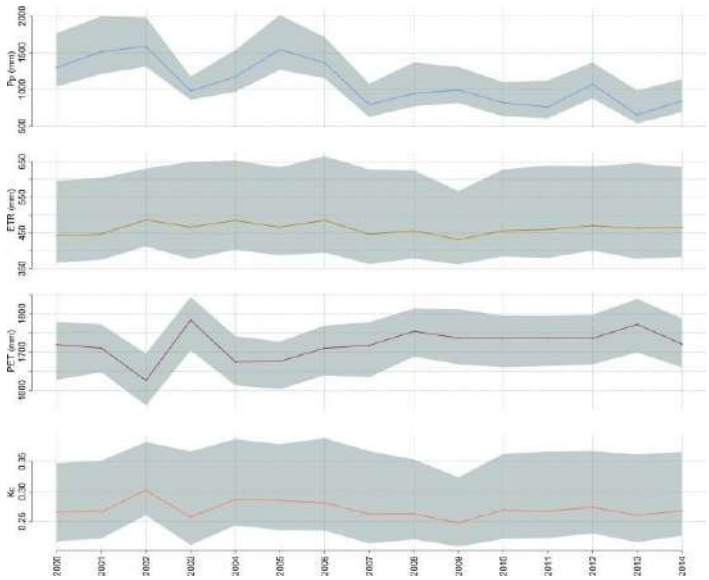


Figura 67. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un gradiente en las Pp de este a oeste siendo mayores al sureste y noreste e inferiores en todo el resto de la cuenca con diferencias de magnitud importantes entre los 600 y los 2500 mm anuales (Figura 68). Se ve una marcada disminución de las precipitaciones en la cuenca en particular durante el último quinquenio. La ETP presenta 3 zonas con valores más elevados en la zona central y menores en la zona este y oeste, pero no se presentan mayores variaciones entre quinquenios. La ETR presenta valores bajos en la zona este donde se ubica la alta cordillera, y en la zona centro-oeste con un gradiente de mayor a menor ETR desde la zona oeste a este, donde existen matorrales degradados y remanentes de bosque esclerófilo hacia la zona de agricultura de riego. Se registran valores altos de ETR en la precordillera donde se ubican los bosques nativos de *Nothofagus* y plantaciones forestales. La zona oeste de la cuenca que colinda con las cuencas costeras donde se ubican extensas plantaciones forestales también presenta elevados valores de ETR, pese a los bajos valores de Pp registrados en la zona, lo que demuestra la eficiencia de estos sistemas para utilizar el agua disponible para su crecimiento.

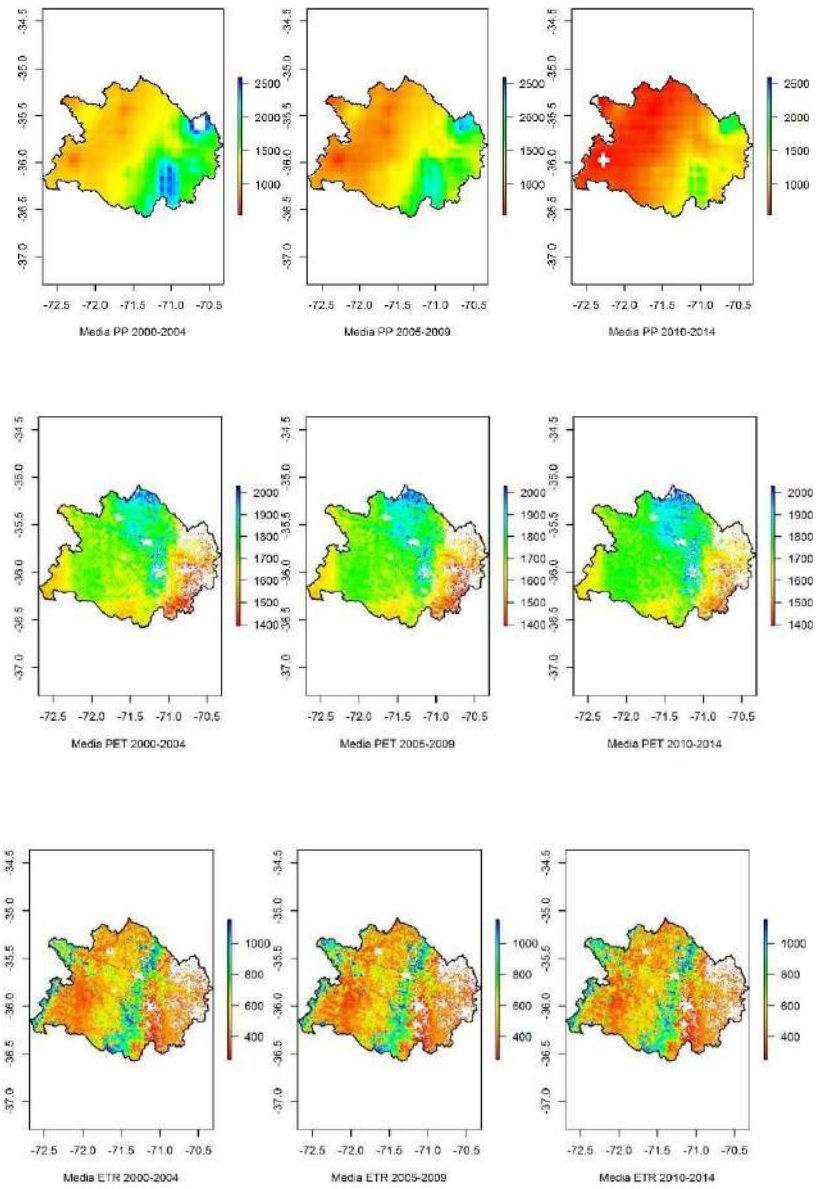


Figura 68. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de tendencias muestra disminuciones significativas de la Pp en toda la cuenca, con valores negativos de tendencia en torno a los 40 a 65 mm de magnitud (Figura 69). La ETP muestra pocos valores significativos de cambio dentro de la cuenca pero se destacan aumentos en la zona central del territorio donde se ubica la agricultura de riego y en la zona de suroeste donde se encuentran las plantaciones forestales. La ETR presenta un patrón muy disímil con valores significativos de cambio en una proporción similar a la ETP pero distribuídos de otra forma en la cuenca. Por ejemplo se destaca la disminución generalizada en el sector de la precordillera donde se ubican la mayoría de los bosques nativos, lo mismo

que sucede en la zona centro-oeste donde se ubican matorrales y bosques esclerofilos que registran valores mas grandes de deficit con valores inferiores a 50 mm de magnitud. Se destaca la zona oeste de la cordillera de la costa donde se ven zonas con aumentos importantes de la ETR, registrandose valores de 100 mm de magnitud, sectores ocupados por plantaciones forestales. El patrón corresponde a las dinámicas de rotación de estos sistemas que duran entre 10 a 20 años siendo presumiblemente aquellas zonas azules las de mayor crecimiento y las rojas aquellas ya cosechas o que fueron victima de incendios.

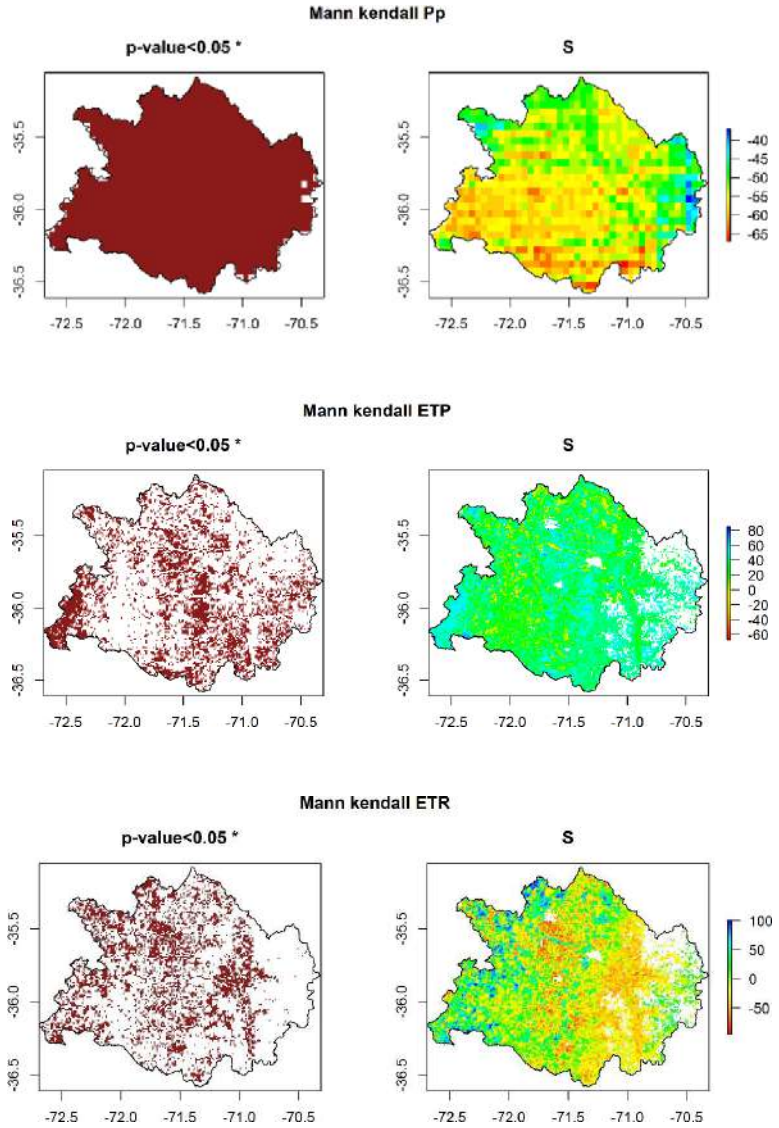


Figura 69. Figuras de tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con numerosas estaciones con datos pluviométricos, con una serie temporal variable pero con la mayoría de sus estaciones con 180 meses de comparación. Todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,8 lo que habla de una excelente precisión de las estimaciones (Figura 70). Los valores de KGE se sitúan en su gran mayoría entre 0,6 y 1 lo que demuestra una buena exactitud de las estimaciones satelitales. Esto permite inferir que los valores satelital de pluviometría son adecuados para evaluar tendencias y magnitudes y además en este caso presentan un elevado número de estaciones bien distribuidas en la cuenca.

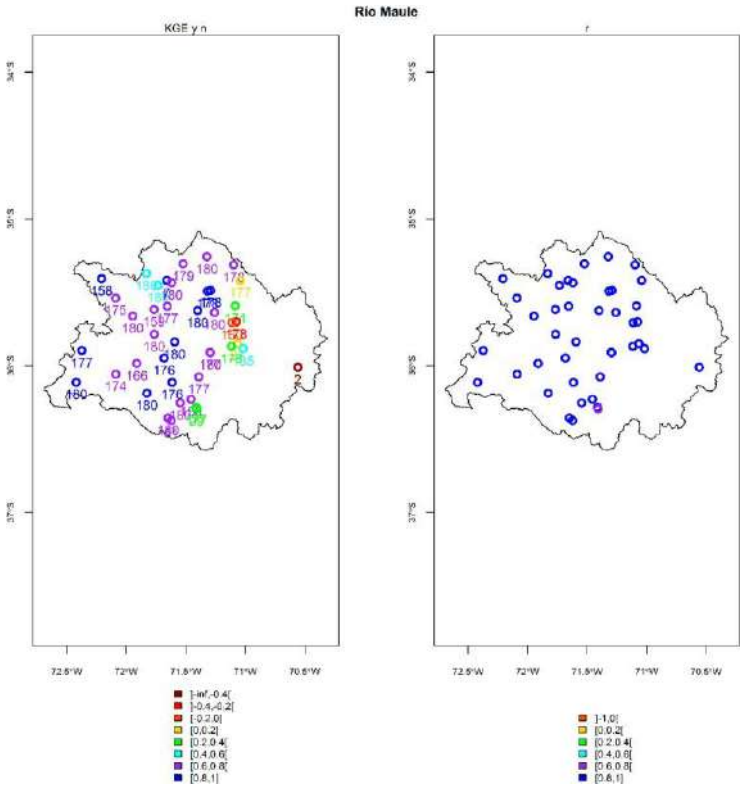


Figura 70. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca cuenta con diez estaciones con datos de ETP la cual presenta buenos valores de ajuste entre el producto satelital y los datos de ETP obtenidas de la estación meteorológica considerando entre 10 y 180 meses de comparación por estación pero con la mayoría de ellas con más de 150 meses. El valor de correlación (r) es superior a 0,8 mostrando una excelente precisión de los datos, y el valor de KGE entre 0,2 y 1 siendo en su mayoría superior a 0,4 (Figura 71). Esto nos permite concluir una adecuada precisión y

exactitud del producto satelital de ETP evaluado en una estación, lo que es adecuado para evaluar tendencias y magnitudes.

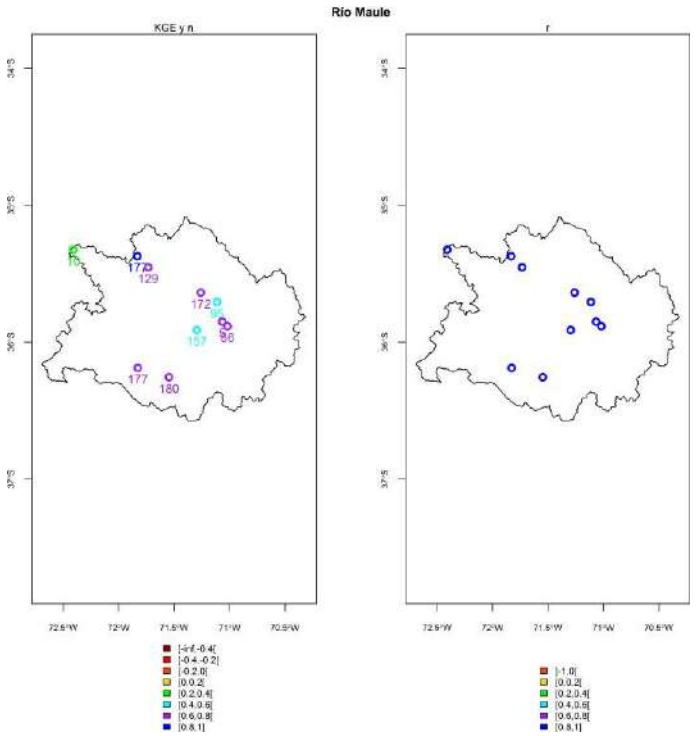


Figura 71. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores negativos desde julio 2007 hasta diciembre 2014 a excepción de los meses de julio 2010 y 2012, y enero 2013 donde los valores son cercanos a 0 (Figura 72). Durante este periodo hubo varios meses donde se registran sequias moderadas y se destacan aquellos periodos donde la sequía llego a ser severa como en julio 2011 y desde mayo 2013 a abril 2014. La principal causa atribuible a esta sequia es la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa dentro de toda la cuenca, siendo la ETP menos influyente aunque se destacan algunas zonas donde esta aumento de forma particularmente importante. En este caso aunque se destaca la zona oeste de la cuenca donde se ubican las plantaciones forestales la que presenta significativos aumentos de la ETP además del descenso en sus Pp. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra mayores valores en el oeste de sequía moderada y valores altos de sequía severa en la zona central y oeste.

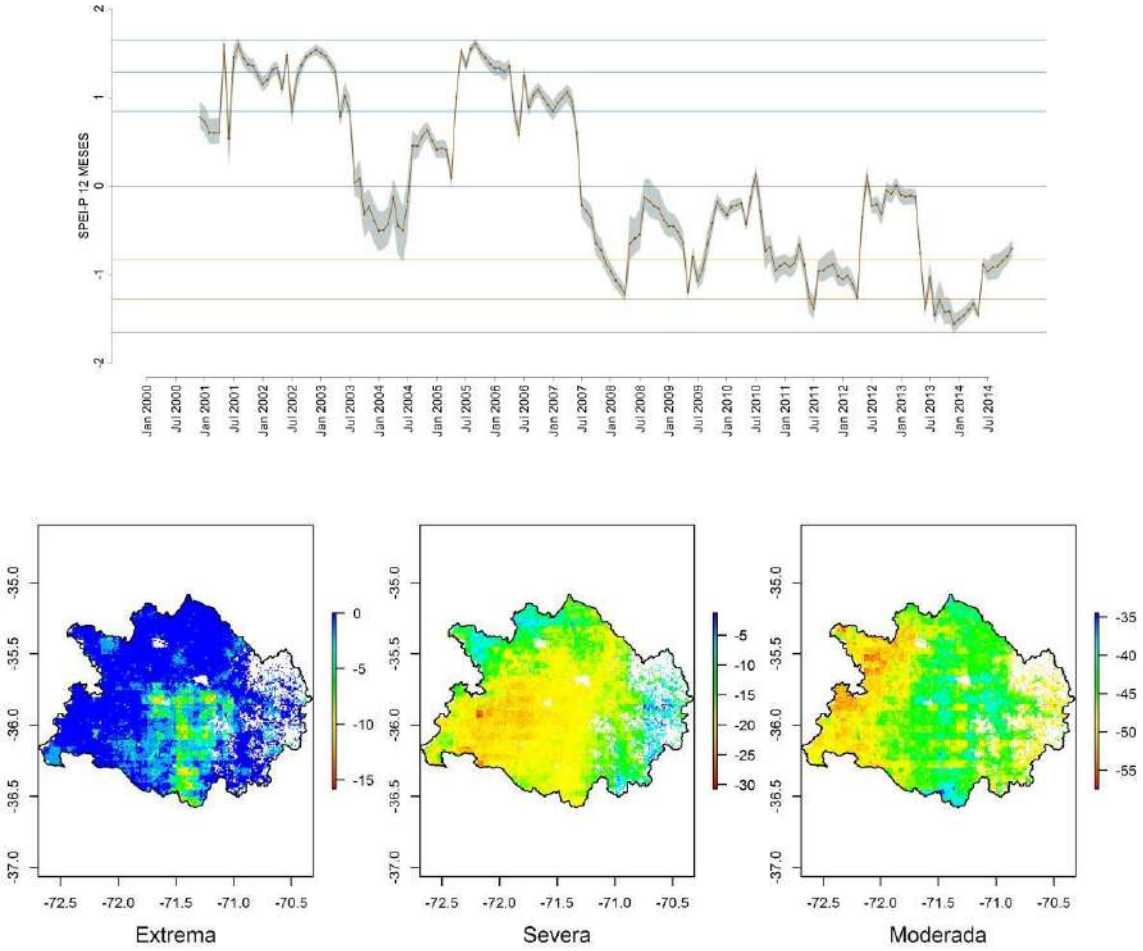


Figura 72. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta un marcado déficit hídrico, debido fundamentalmente al descenso significativo de las precipitaciones, pero también al aumento de la ETP el cual se da en numerosos sectores de la cuenca aludiendo a condiciones micro-climáticas. Se observa una marcada disminución de la ETR en la pre-cordillera, y en sectores del valle central donde la vegetación experimenta un estrés hídrico. No obstante las condiciones de sequía imperantes, la vegetación en ciertos sectores presenta aumentos de la ETR aludiendo a condiciones de riego o a una mayor eficiencia en el uso del agua en condiciones de disminución de las precipitaciones y aumento de la ETP en el caso de las plantaciones forestales, las que se ubican en la zona oeste de la cuenca, lugar donde se acumula el mayor déficit.

Región del Biobío

La región presenta 6 cuencas analizadas donde se destaca la presencia de sequias extremas en la cuenca del Biobío (0803) (Figura 73). Pese a esto, si consideramos el criterio de sequía moderada que integra todos los efectos de las sequías moderadas, severas y extremas la cuenca costera 0805 es aquella que presenta la mayor magnitud con valores de -48. Al no tener datos de validación de los productos satelitales se utilizó la cuenca costera vecina 0805, la cual presenta una importante magnitud de déficit tanto para el criterio moderado así como severo, presentando además datos de validación.

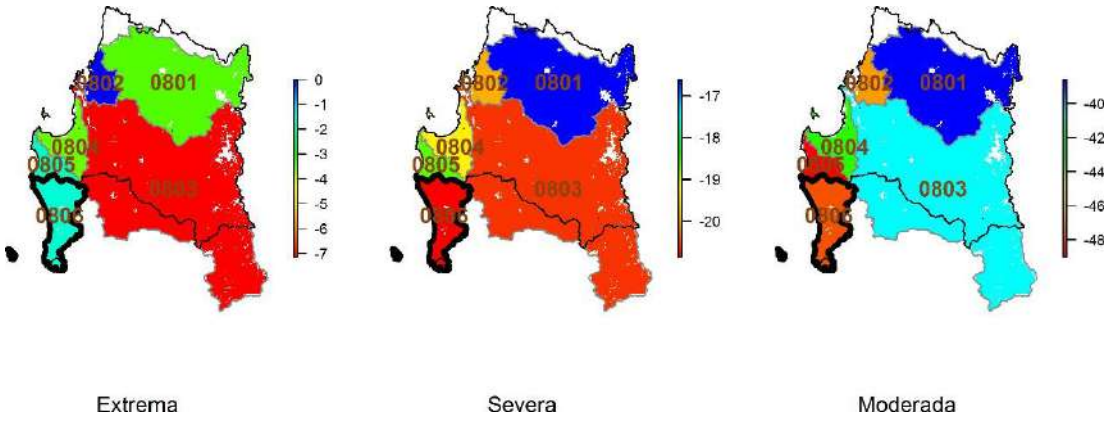


Figura 73. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Biobío, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca costera entre Lebu y Tirúa.

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso constante que se acentúa desde el año 2006 y posteriormente se mantiene con niveles bajos apenas sobre los 850 mm anuales (Figura 74). La ETP presenta una tendencia al aumento durante el periodo de estudio con valores continuamente crecientes desde el año 2009 al 2014 donde resalta el año 2008 con valores muy superiores a la tendencia. La ETR presenta valores bastante estables aunque se destaca una gran dispersión de las observaciones dadas por las diferentes coberturas de suelo. Estos resultados implican que el déficit está regulado mayoritariamente por el déficit de lluvia aunque desde el año 2009 en adelante el efecto de la ETP es de relevancia.

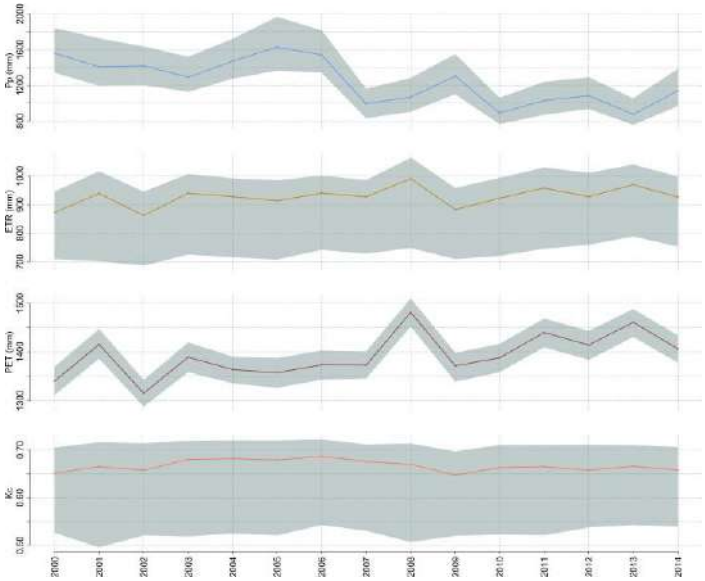


Figura 74. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un gradiente creciente en las Pp de este a oeste con diferencias de magnitud importantes entre los 800 y los 1800 mm anuales (Figura 75). Se ve una marcada disminución de las precipitaciones en la cuenca en particular durante el último quinquenio. La ETP presenta dos grandes zonas con valores inferiores en la zona oeste próxima a la costa y valores mayores hacia el este y se distingue un aumento generalizado durante el último quinquenio, particularmente en la zona este y sur de la cuenca. La ETR también presenta grandes variaciones espaciales con valores cercanos a los 500 mm en la zona oeste (costera) y valores cercanos a los 1000 mm en zona norte y este de la cuenca donde se concentran una gran cantidad de plantaciones forestales. Se registra un aumento de la ETR durante el último quinquenio en muchas de estas zonas relevando un mayor consumo de agua durante ese periodo, lo que es consistente con el aumento de la ETP y contrasta con el declive de las precipitaciones.

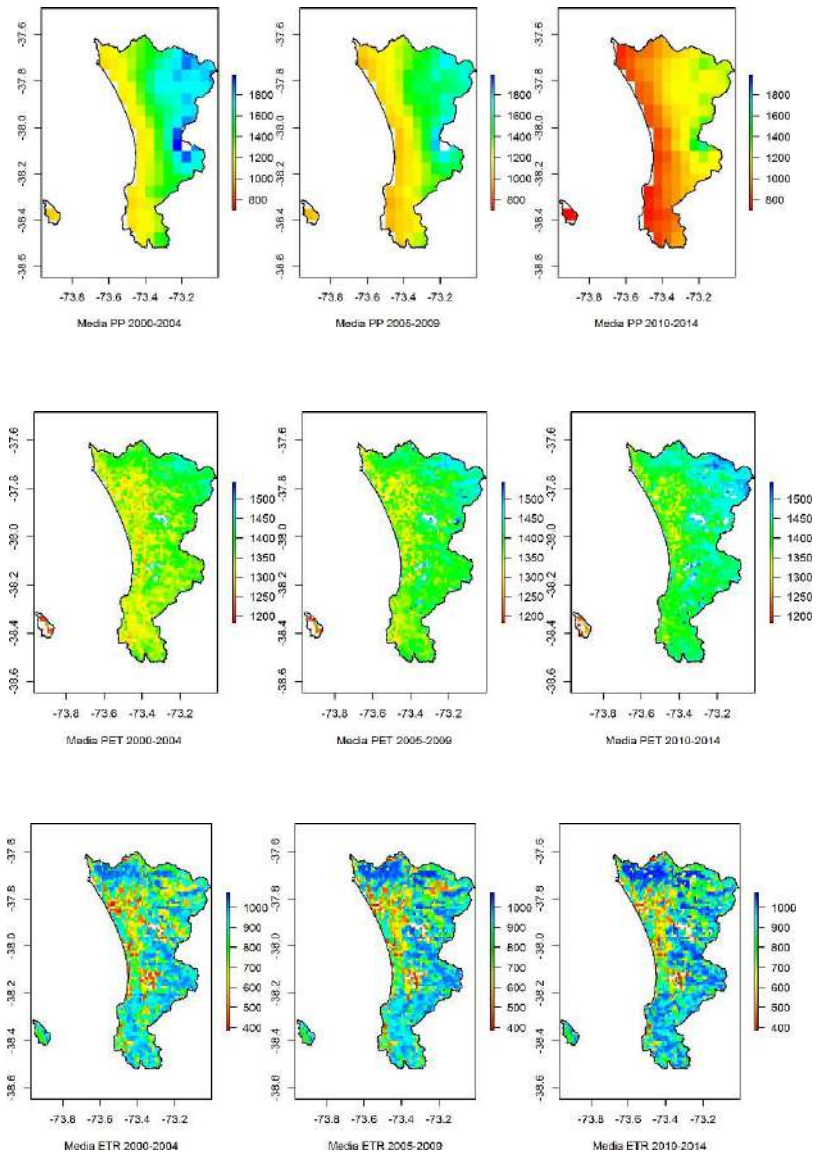


Figura 75. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de tendencias muestra disminuciones significativas de la Pp en toda la cuenca, con valores negativos de tendencia en torno a los 40 a 65 mm de magnitud (Figura 76). La ETP tambien muestra valores significativos de aumento para casi toda la cuenca con algunas excepciones en la zona costera inmediata y algunos sectores del interior en particualr cercanos a la zona norte. La ETR presenta menos valores de cambio significativo, pero con un patron atomizado de gran dispersión, lo que se vincula a la estructura fragmentada de este territorio donde co-existen parches con vegetacion remanente de

vegetacion nativa y praderas que presentan una disminucion de la ETR y sectores forestales donde se produce un aumento de la ETR.

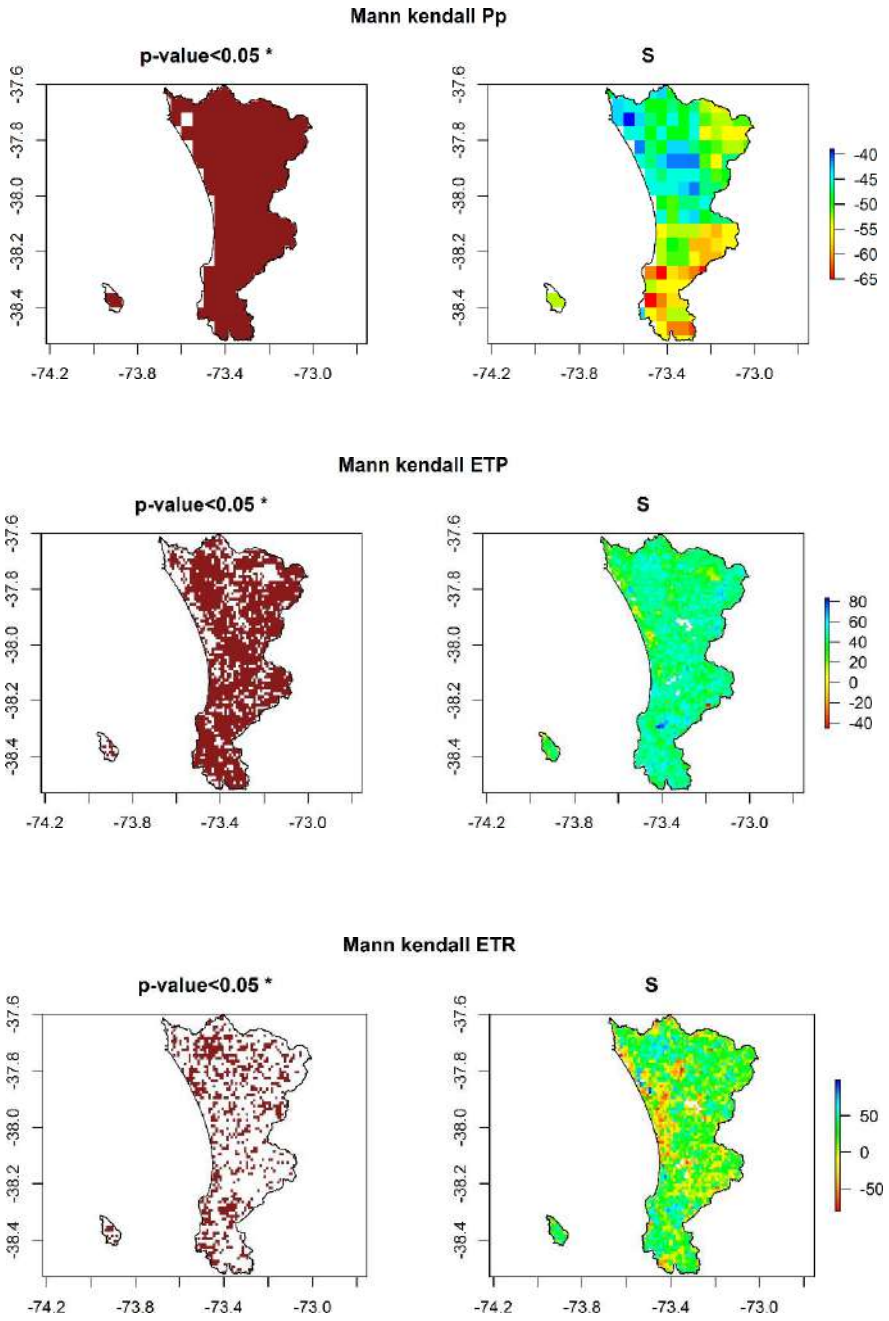


Figura 76. Figuras de tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con 4 estaciones con datos pluviométricos que cubren buena parte de la cuenca, con una serie temporal entre 61 y 179 meses siendo la mayoría de las estaciones con más 160 meses. Todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,8 lo que habla de una precisión de las estimaciones (Figura 77). Los valores de KGE nos indican una buena exactitud de los datos sin sesgo al situarse el valor en el rango entre 0,8 y 1, a excepción de la estación localizada al sur de la cuenca donde existe un valor de KGE sumamente deficiente, lo que demuestra un problema de exactitud en esa zona. De esta forma se puede concluir que los datos satelitales de precipitación pueden usarse de forma concreta para evaluar la magnitud y tendencia salvo en la zona sur donde solo se puede usar para evaluar la tendencia.

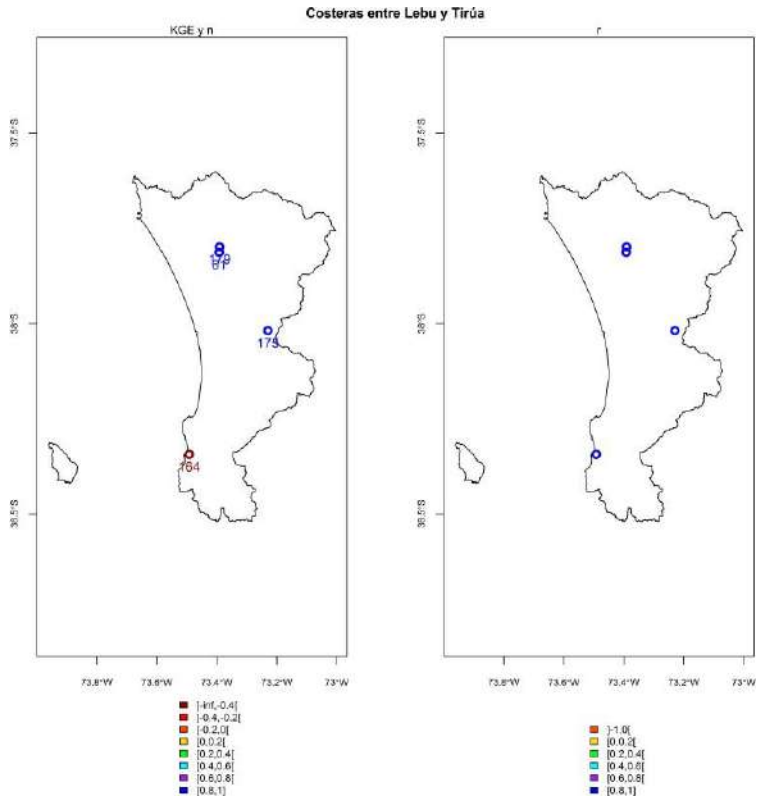


Figura 77. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca solo presenta una estación de comparación para ETP con 155 registros mensuales (Figura 77). Los valores de correlación son precisos al estar en el rango entre 0,8 y 1, siendo el valor de KGE entre 0,4 y 0,6 por lo que la cuenca presenta ajustes aceptables para esta variable, tanto para evaluar las magnitudes de esta variable así como

las tendencias de las métricas derivadas de esta variable y la variable misma aunque debe considerarse que solo existe una estación de validación.

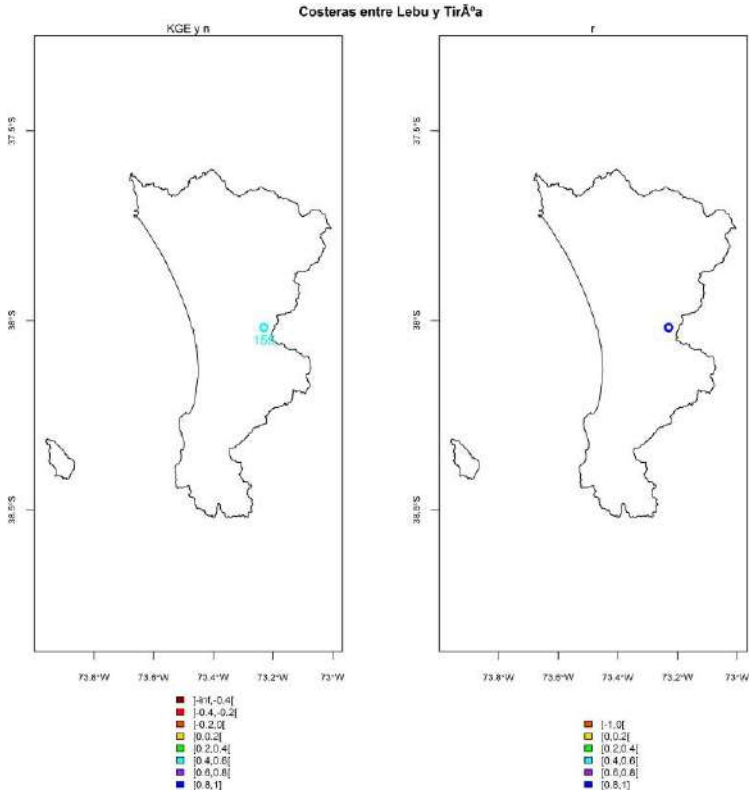


Figura 77. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores de sequía moderada desde la primavera 2007 al invierno 2008, después desde el verano 2009 hasta el invierno 2009 y después se registra un periodo de sequía con algunas intermitencias entre la primavera 2011 e invierno 2014, donde se restablece una condición de normalidad (Figura 78). Cabe destacar el nivel extremo de sequía que se generó en junio 2013 y que prosiguió con valores de sequía severa hasta junio 2014. Las causas atribuibles a esta sequía son la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa dentro de toda la cuenca, y el aumento generalizado de la ETP que es significativa en gran parte de la cuenca. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra una tendencia generalizada de valores altos de sequía moderada en toda la cuenca, mientras que los valores mayores de sequía severa se encuentran en la zona este de la cuenca.

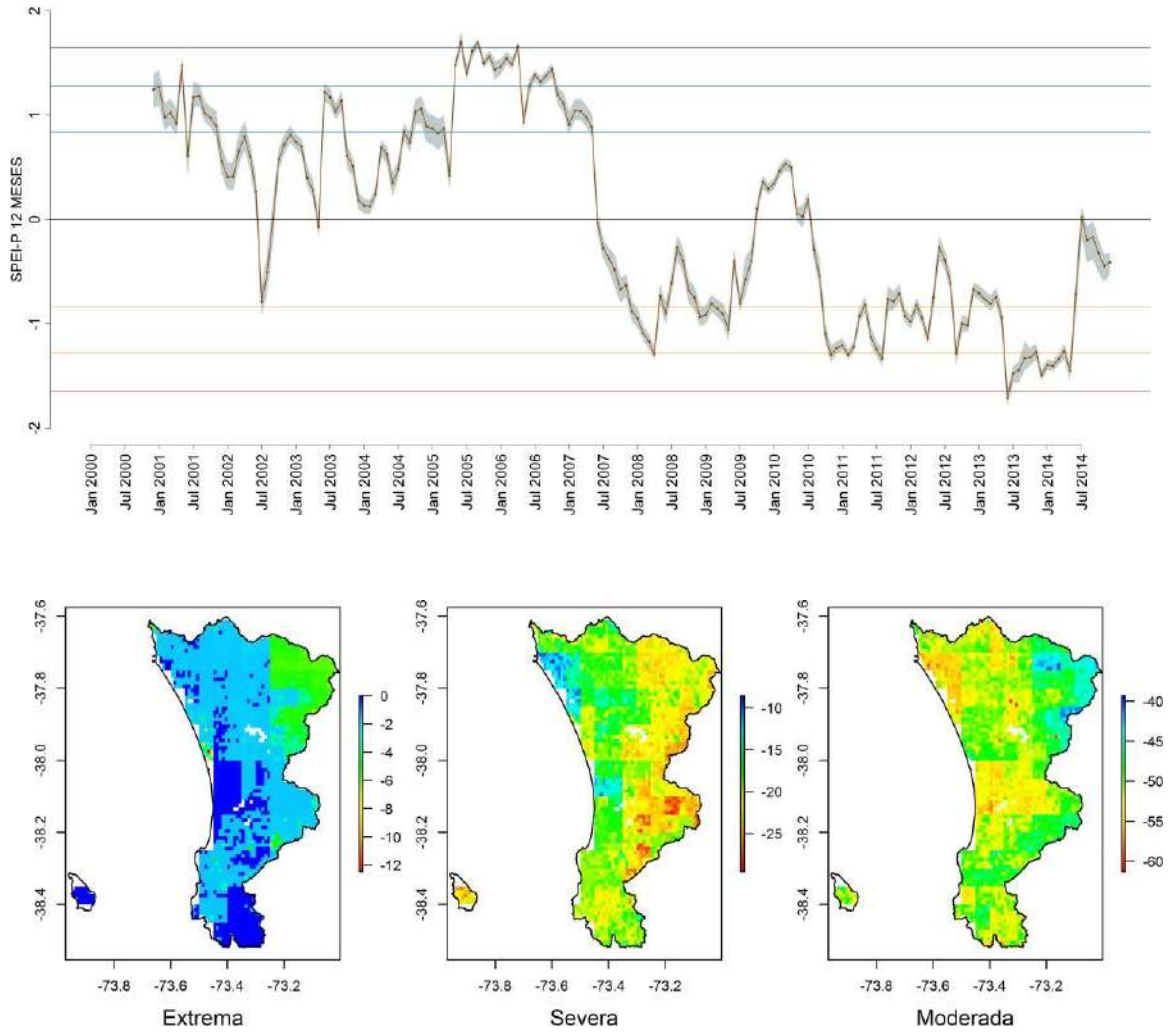


Figura 78. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca niveles de sequía extremadamente elevados dados por efecto combinado del declive de las Pp y del aumento de ETP, registrándose niveles dentro de los más altos del país de sequía. No obstante esta situación, la ETR aumenta en gran parte de la cuenca, aludiendo a mejores condiciones de demanda atmosférica, y a una condición de Pp por sobre el umbral de los requerimientos de la vegetación presente en esta zona la cual corresponde en su mayoría a plantaciones forestales. Este efecto puede tener consecuencias serias en el balance hidrológico afectando de forma negativa la escorrentía de la cuenca.

Región de Araucanía

La región presenta tres grandes cuenca, entre las que se encuentra la del Biobío que es compartida con la región del mismo nombre. Las tres cuencas presentan niveles elevados de déficit, siendo la cuenca del río Toltén (cod. 0903), la que presenta una mayor magnitud de sequía moderada, destacándose sus valores de sequía extrema lo que sorprende en esta región de precipitaciones abundantes (Figura 79). Estas cuencas dependen de las reservas existentes en los lagos y nieves acumuladas en las cumbres situadas en la cordillera de los Andes.

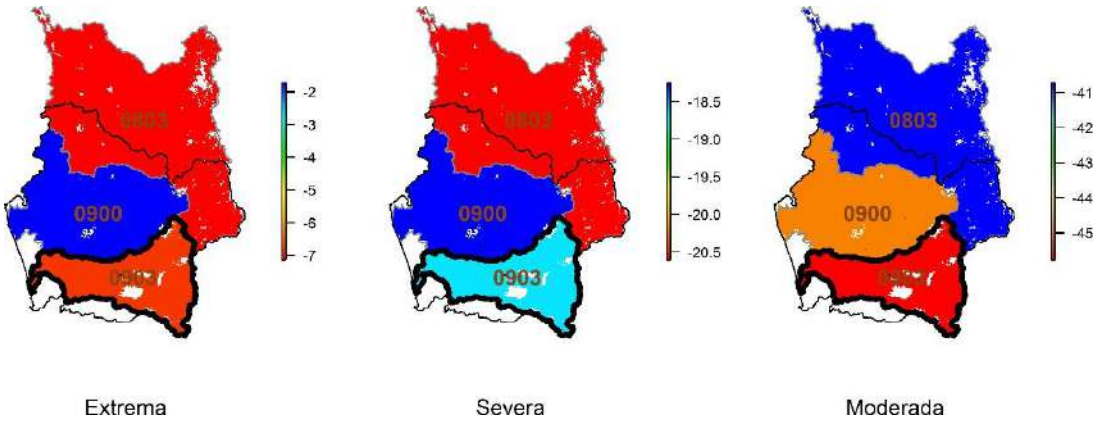


Figura 79: Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de la Araucanía, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca Río Toltén (cod 0903).

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso constante desde los 2500 mm, el cual se acentúa desde el año 2006 para posteriormente mantenerse en niveles bajos e intermitentes entre los 1500 y los 2000 mm (Figura 80). La ETP presenta una tendencia al aumento durante el periodo de estudio con valores continuamente crecientes desde el año 2005 al 2014, donde resalta el año 2008 donde hubo valores de ETP superiores al resto de la serie a excepción del año 2013 donde se volvió a alcanzar esos valores. La ETR presenta valores bastante estables. Estos resultados implican que el déficit está regulado por el efecto conjunto de la declinación de las precipitaciones y el aumento de la ETP.

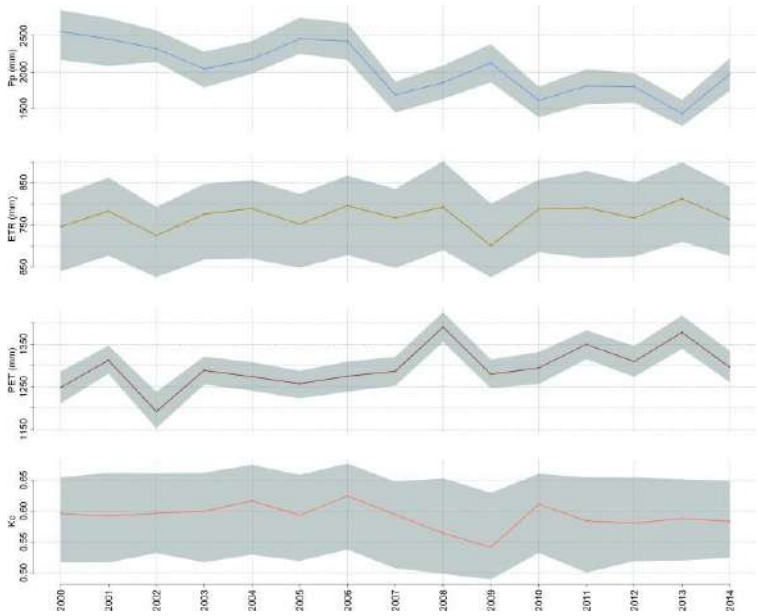


Figura 80. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un gradiente creciente en las Pp de este a oeste con diferencias de magnitud importantes entre los 1300 y los 3700 mm anuales (Figura 81). Estos últimos valores ubicados en la zona noreste. Se ve una marcada disminución de las precipitaciones en la cuenca en particular durante el último quinquenio, la que se manifiesta de forma generalizada en todo el territorio. La ETP presenta un patrón de distribución muy heterogéneo destacándose dos magnitudes de valores registrándose valores inferiores en las zonas de relieve y en valores mayores en las zonas planas. Se registra un aumento muy marcado durante el último quinquenio en particular en las zonas más planas. La ETR también presenta grandes variaciones espaciales con los valores más elevados en la zona oeste de la cuenca donde se concentran las plantaciones forestales y con valores intermedios en la zona central de la cuenca donde existen importantes extensiones de bosque nativo y valores inferiores en la zona cordillerana donde hay menos vegetación. Se registra un aumento de la ETR durante el último quinquenio en la zona oeste donde se ubican las plantaciones forestales lo que contrasta con la disminución de las precipitaciones.

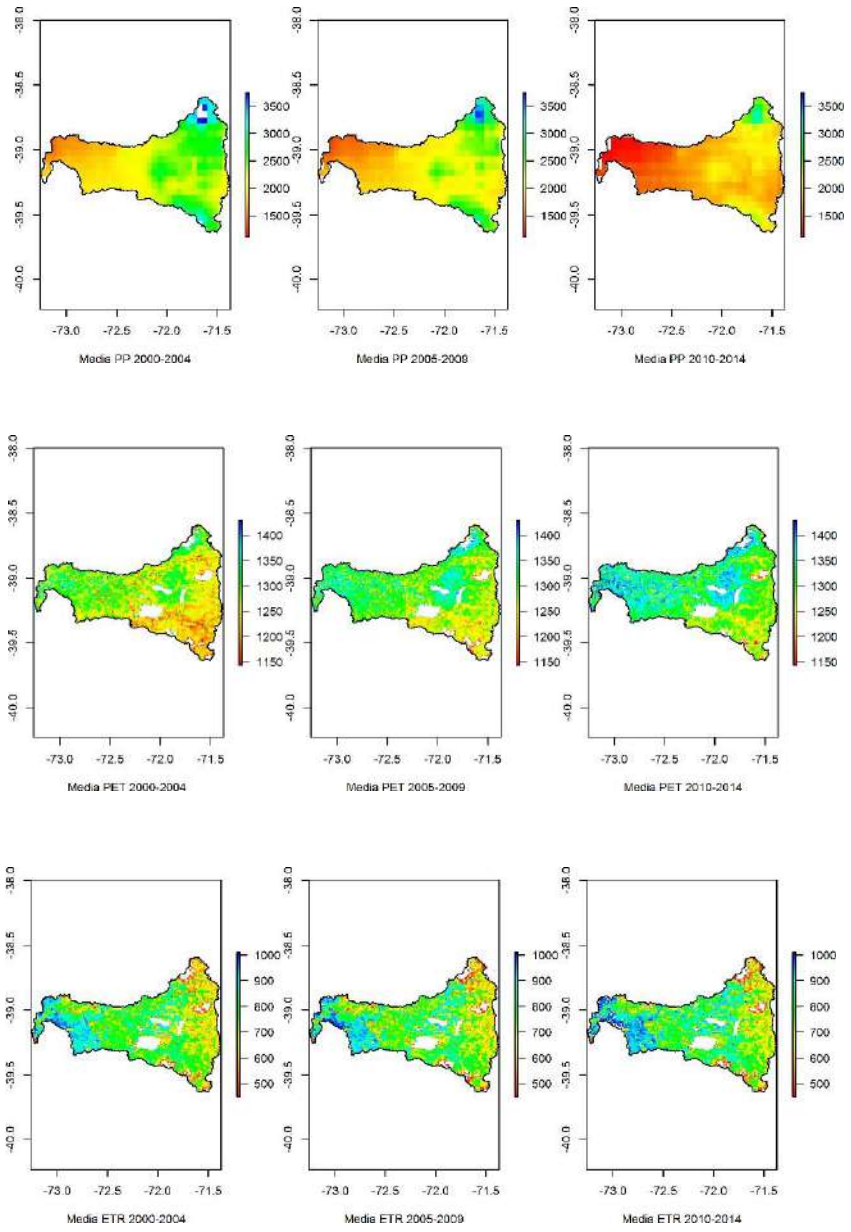


Figura 81. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de tendencias muestra disminuciones significativas de la Pp en toda la cuenca, con valores negativos de tendencia en torno a los 45 a 70 mm de magnitud. La ETP tambien muestra valores significativos para casi toda la cuenca con algunas excepciones en la zona cordillerana y en algunos parches de la zona baja donde el paisaje se encuentra altamente fragmentado. La ETR presenta menos valores de cambio significativo, pero con un patron atomizado de gran dispersión, lo que se vincula a la estructura fragmentada de este territorio

donde co-existen parches con vegetacion remanente de vegetacion nativa, y praderas que presentan una disminucion de la ETR y sectores forestales donde se produce un aumento de la ETR.

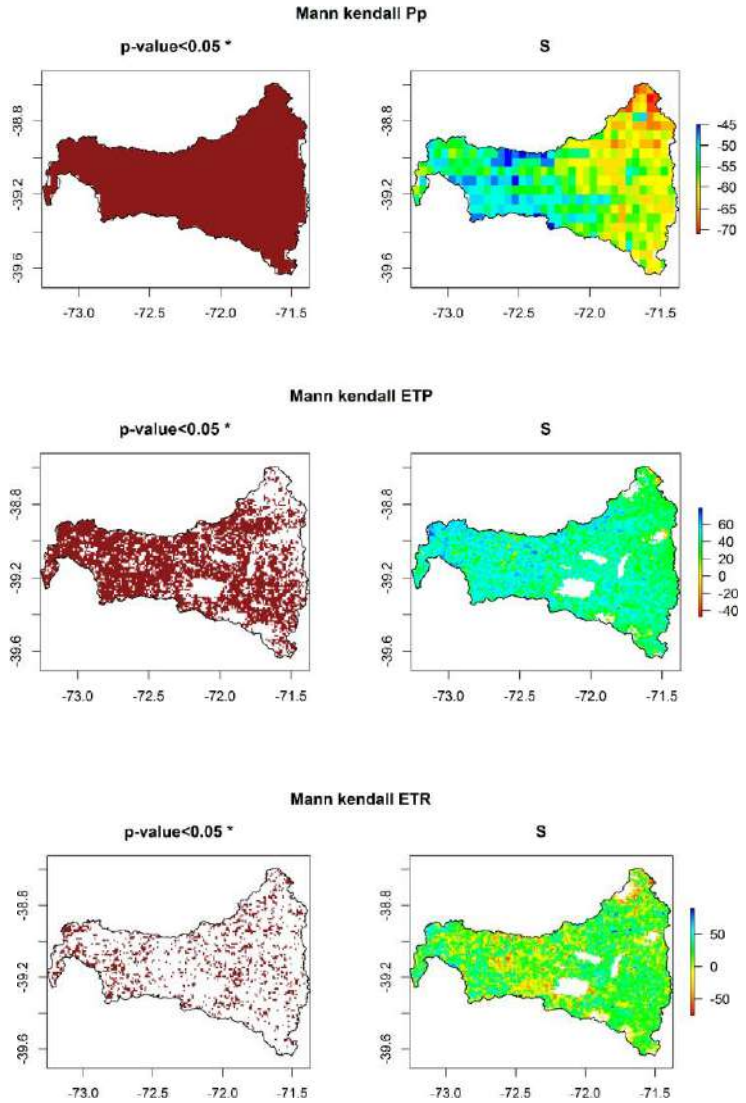


Figura 82. Figuras de tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con 21 estaciones con datos pluviométricos que cubren buena parte de la cuenca, con una serie temporal entre 84 y 180 meses siendo la mayoría de las estaciones con más 170 meses. Todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,8 lo que habla de una precisión de las estimaciones (Figura 83). Los valores de KGE nos indican una buena exactitud de los datos sin sesgo al situarse la mayoría de los valores en el rango entre 0,8 y 1, pero con algunas estaciones con valores levemente inferiores en la zona sureste de la cuenca. De esta forma se puede concluir que los datos satelitales de precipitación pueden usarse de forma concreta para evaluar la magnitud y tendencia con ciertas precauciones en la zona sureste para evaluar la magnitud.

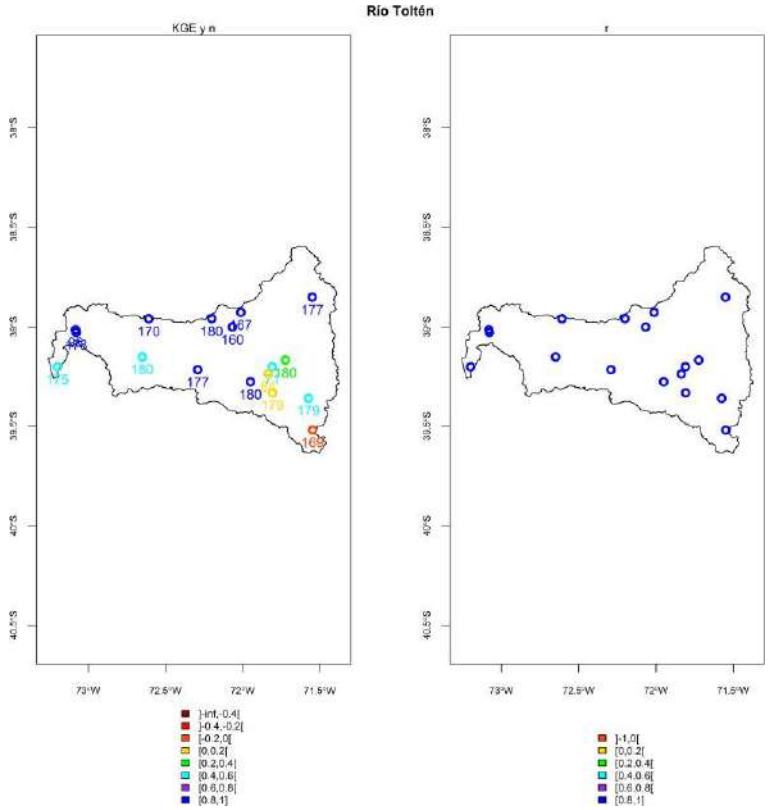


Figura 83. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta cinco estaciones de comparación para ETP con más de 145 registros mensuales a excepción de una estación que solo tiene 17 valores. La distribución espacial cubre diferentes sectores de la cuenca habiendo más estaciones en la zona cordillerana (Figura 84). Los valores de correlación son precisos al estar en el rango entre 0,8 y 1, siendo el valor de KGE entre 0,6 y 0,8 y levemente inferior en la zona oeste de la cuenca. En este

sentido la cuenca presenta ajustes aceptables para esta variable, tanto para evaluar las magnitudes de esta variable así como las tendencias de las métricas derivadas de esta variable y la variable misma.

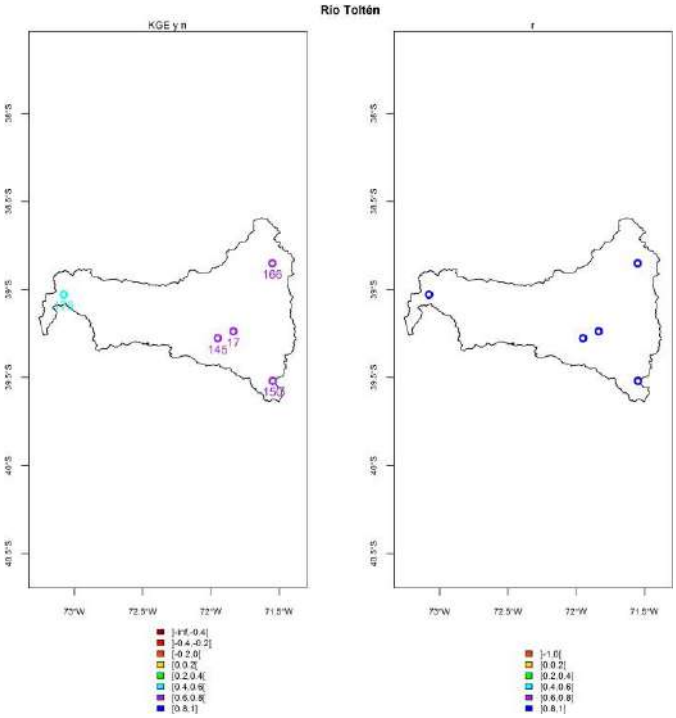


Figura 84. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores de sequía moderada desde la primavera 2007 al invierno 2009, y después se registra un periodo de sequía con algunas intermitencias entre la primavera 2010 e invierno 2014, donde se restablece una condición de normalidad. Cabe destacar el nivel severo y extremo de sequía que se generó entre abril 2013 y julio 2014 destacándose los valores extremos para los meses de mayo, junio, julio y diciembre 2013. Las causas atribuibles a esta sequía es el efecto conjunto de la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa dentro de toda la cuenca, y el aumento generalizado de la ETP que es significativa en gran parte de la cuenca. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra mayores valores de sequía moderada en la zona cordillerana y valores altos de sequía severa en el extremo noroeste y en la zona costera de la cuenca.

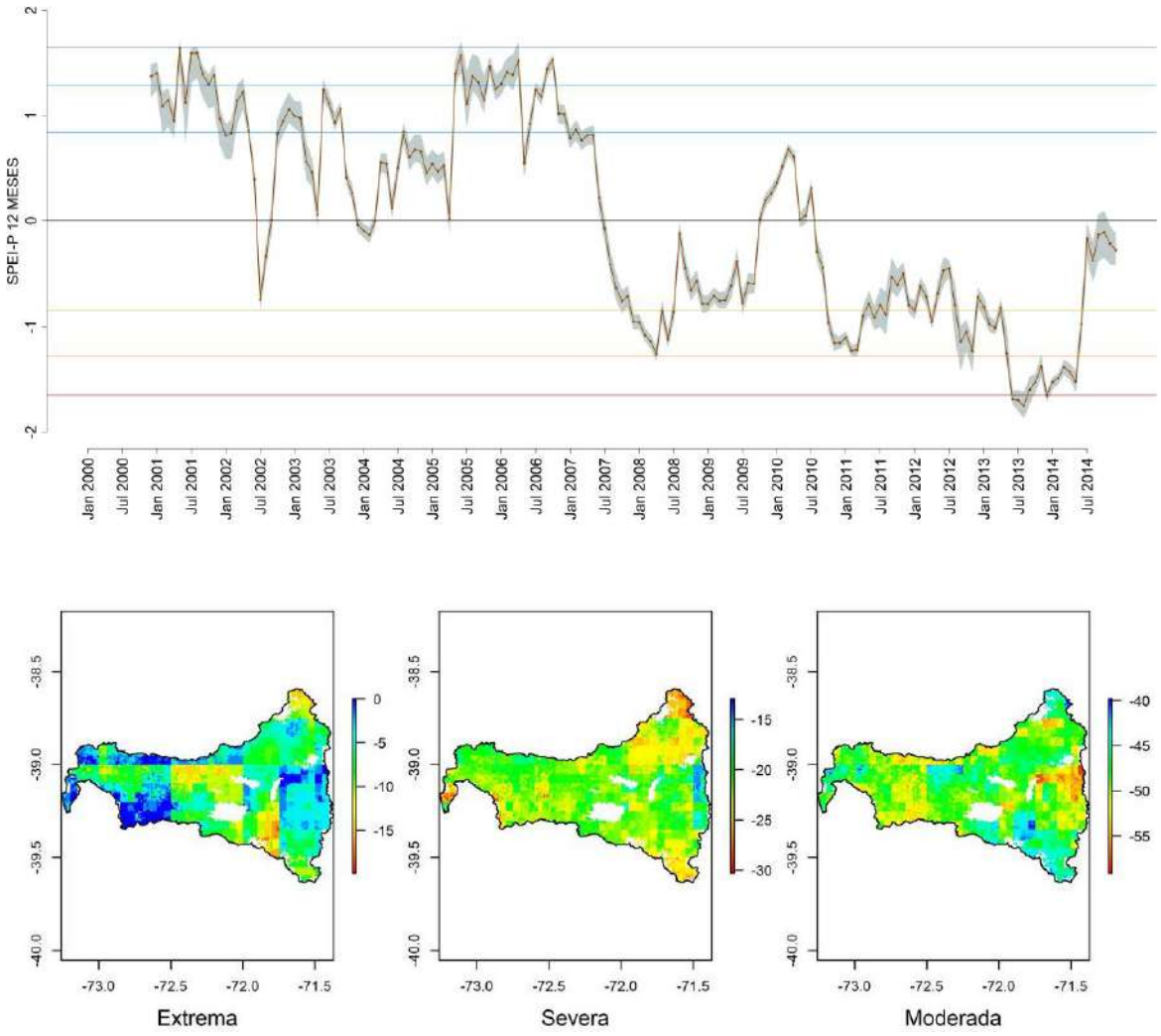


Figura 85. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta una marcada situación de déficit hídrico la cual se producto de la declinación de las precipitaciones y el aumento de ETP siendo ambos significativos. Esta situación no ocasiona grandes cambios en el consumo de agua (ETR), a diferencia de otras cuencas bajo la misma situación, lo que podría deberse a la presencia mayoritaria de bosque nativo el cual podría estar reaccionando menos frente a estas condiciones climáticas variables, lo que tendría menos repercusiones en la escorrentía de la cuenca, aludiendo a una mayor resiliencia de esta cuenca.

Región de los Ríos

La región presenta tres grandes cuenca y una pequeña en la cordillera (cod. 1404), la que registra los valores más grandes de magnitud de déficit en cuanto a valores extremos, severos y moderados (Figura 86). No obstante estos resultados, esta cuenca no se analizó debido a la falta de datos *in situ* de validación de las estimaciones satelitales siendo seleccionada la cuenca del río Valdivia la que presenta magnitudes de déficit importantes tanto de sequía moderada así como de sequía severa a diferencias de las otras cuencas grandes.

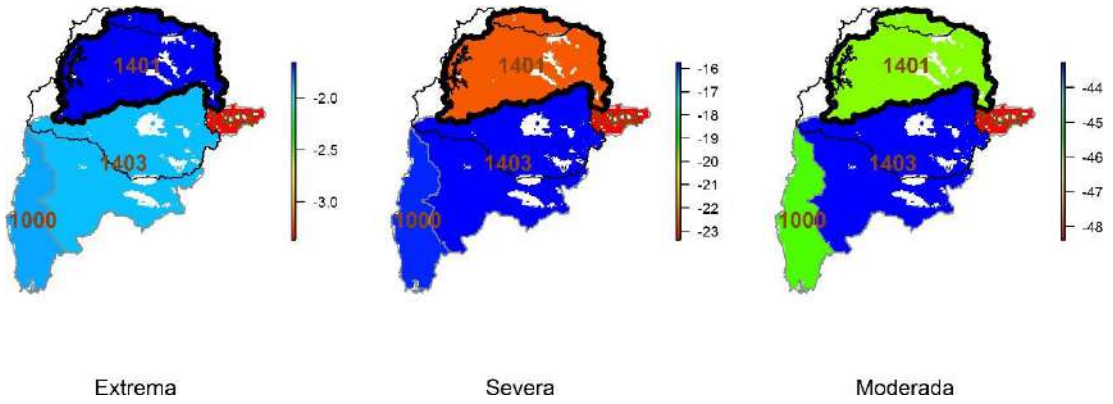


Figura 86. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de los Ríos, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca costera entre Rio Valdivia (cod. 1401).

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso marcado desde año 2007, situación que se mantuvo hasta el año 2014, registrándose valores más bajos de Pp las cuales fluctúan en torno a los 1600 mm anuales (Figura 87). Esto implica un relevante descenso desde los 2100 mm anuales que se registraba antes de esa fecha. La ETP presenta una tendencia al aumento durante el periodo de estudio con valores continuamente crecientes desde el año 2006 al 2014, donde resalta el año 2008 donde hubo valores de ETP superiores al resto de la serie. La ETR presenta valores bastante estables. Estos resultados implican que el déficit está regulado por el efecto conjunto de la declinación de las precipitaciones y el aumento de la ETP.

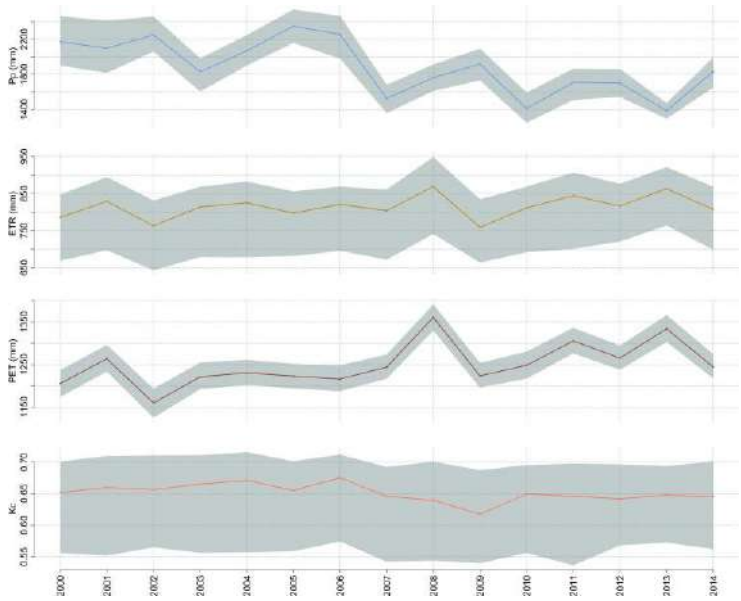


Figura 87. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un gradiente en las Pp con valores relativamente altos en la zona oeste de la cuenca, en la zona central valores más bajos de la variable y en la zona este los valores más altos en la zona cordillerana (Figura 88). Se observa una marcada disminución de las precipitaciones en la cuenca en particular durante el último quinquenio, la que se manifiesta de forma generalizada en todo el territorio. La ETP presenta un patrón de distribución muy heterogénea pero sin grandes variaciones en magnitud registrándose valores inferiores en las zonas de relieve y valores mayores en las zonas planas. Se observa un aumento marcado durante los dos últimos quinquenios en particular en las zonas más planas. La ETR también presenta grandes variaciones espaciales con los valores más elevados en la zona noroeste de la cuenca donde se concentran las plantaciones forestales y con valores intermedios en la zona central de la cuenca donde existen importantes extensiones de bosque nativo y valores inferiores en la zona cordillerana donde hay menos vegetación. Se registra un aumento de la ETR durante el último quinquenio en la zona oeste donde se ubican las plantaciones forestales lo que contrasta con la disminución de las precipitaciones.

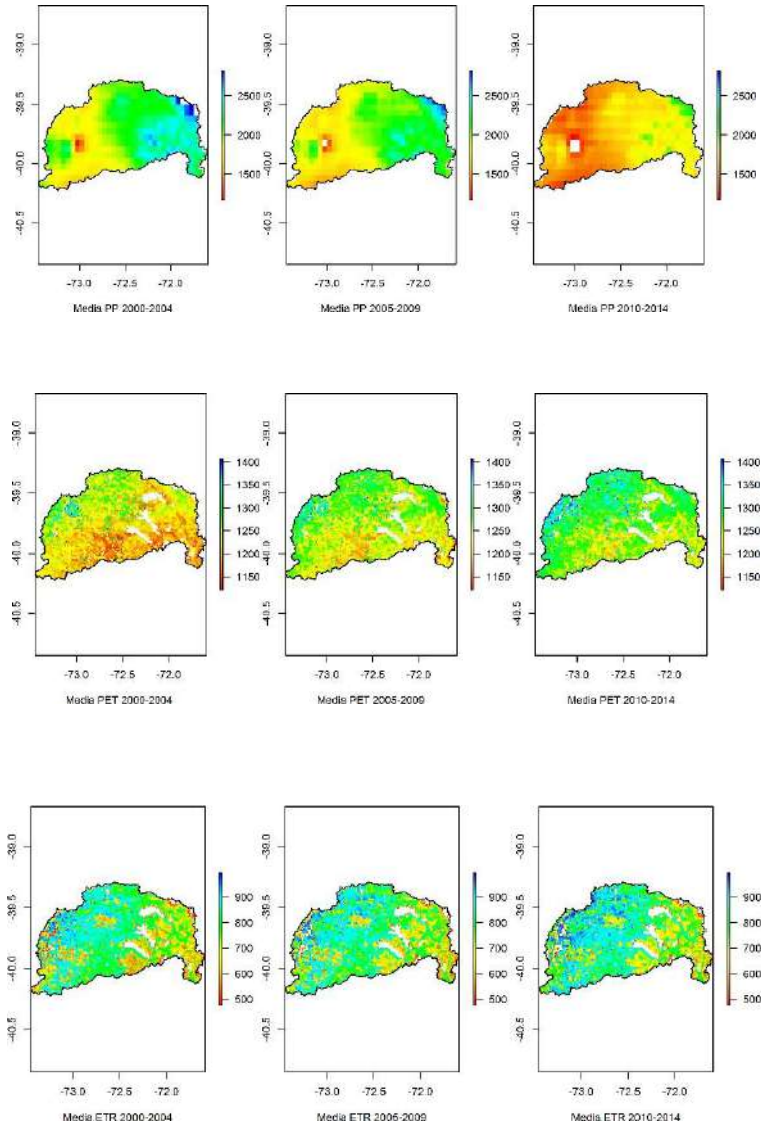


Figura 88. Cartografías de precipitación, ETR y ETP media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de Tendencias muestra disminuciones significativas de la Pp en practicamente toda la cuenca, con valores negativos de tendencia en torno a los 35 a 65 mm de magnitud (Figura 89). La ETP tambien muestra valores de aumento significativo para una gran proporción de la cuenca con algunas excepciones en la zona oeste de la cuenca donde se concentran una gran cantidad de praderas, bosque nativo y plantaciones forestales en torno las cuales se encuentran en zonas aledañas al humedal del río cruces. La ETR presenta pocos valores de cambio significativo, con un patron atomizado de gran dispersión, aunque se destacan valores de aumento en la tendencia a excepción de la zona norte del humedal del rio cruces que presenta un descenso en la ETR.

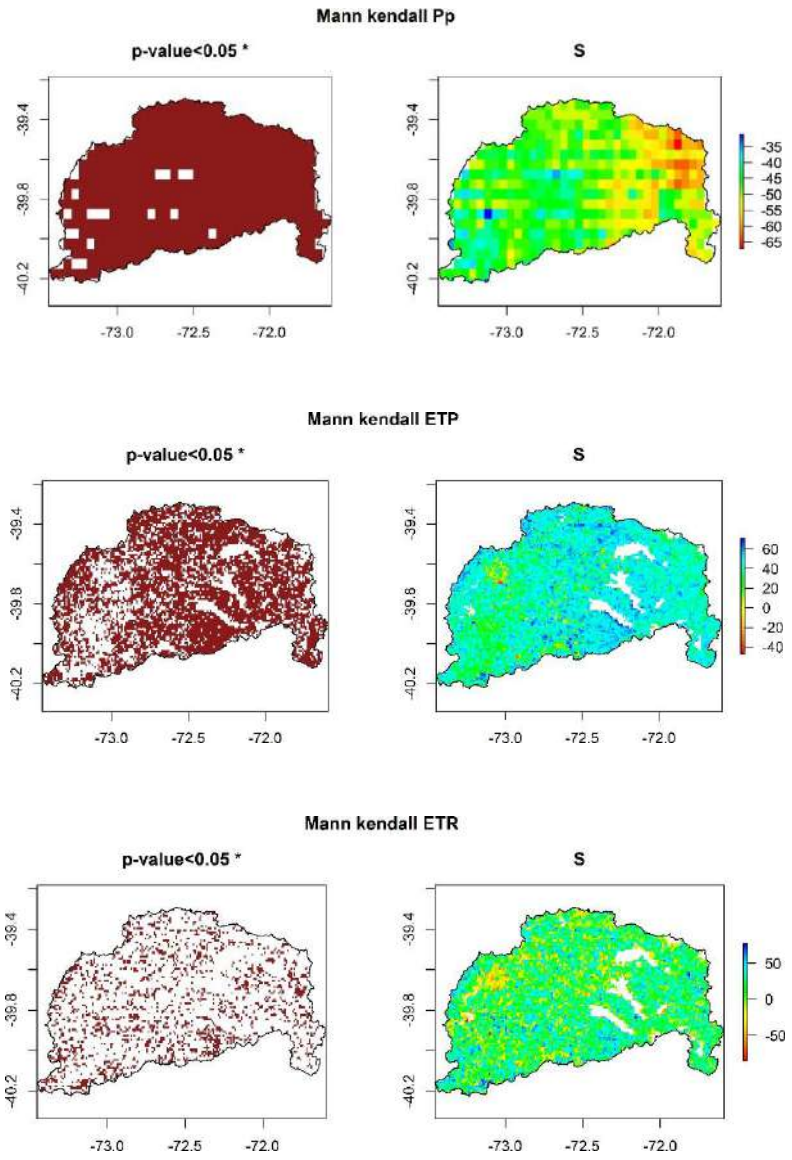


Figura 89. Figuras de tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con 18 estaciones con datos pluviométricos que cubren buena parte de la cuenca, con una serie temporal entre 23 y 180 meses siendo la mayoría de las estaciones con más 170 meses (Figura 90). Todas las estaciones (excepto 1) presentan un valor de correlación superior a 0,8 lo que habla de una adecuada precisión de las estimaciones. Los valores de KGE nos indican una aceptable exactitud de los datos sin sesgo al situarse la mayoría de los valores por sobre el rango de 0,4 habiendo más de la mitad de ellas con una valor de KGE por sobre 0,6, pero con la salvedad de dos estaciones ubicadas en el extremo sur este y en cerca del otro extremo suroeste. De todas formas se puede concluir que los datos satelitales de precipitación pueden usarse de forma concreta para evaluar la magnitud y tendencia con ciertas precauciones en estas zonas para evaluar la magnitud.

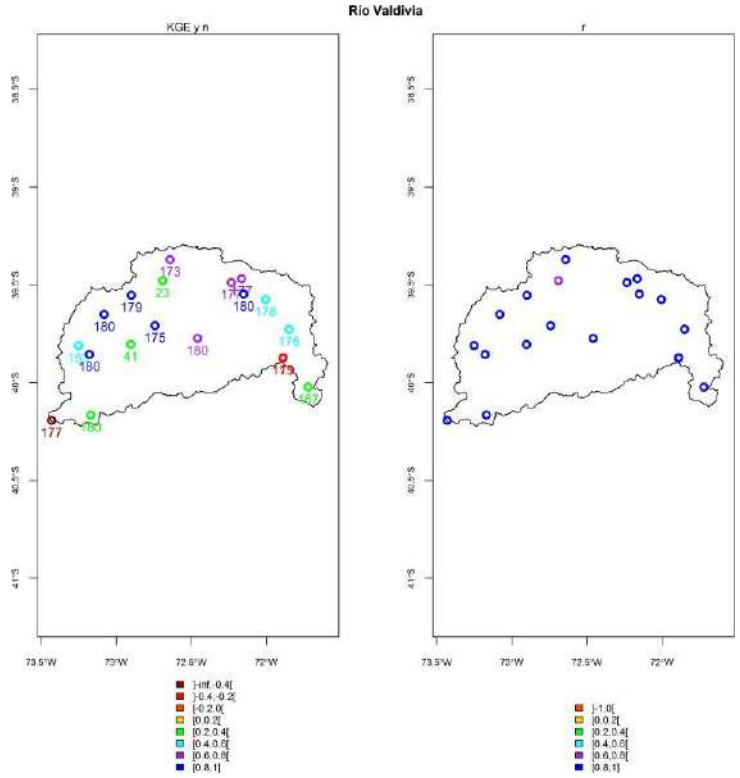


Figura 90. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta solo dos estaciones de comparación para ETP una con 180 valores y otra con 20 valores. La distribución espacial cubre los dos extremos de la cuenca en sentido este oeste (Figura 91). Los valores de correlación son precisos al estar en el rango entre 0,8 y 1, siendo el valor de KGE entre 0,6 y 0,8 para la estación ubicada en la zona oeste de la cuenca y la que cuenta con más datos y levemente inferior para la estación ubicada en

la zona este de la cuenca con valores entre 0,4 y 0,6 denotando un leve efecto de sesgo. Se concluye que la cuenca presenta ajustes aceptables para esta variable, tanto para evaluar las magnitudes de esta variable así como las tendencias de las métricas derivadas de esta variable y la variable misma con algo de precaución para las magnitudes de la zona cordillerana.

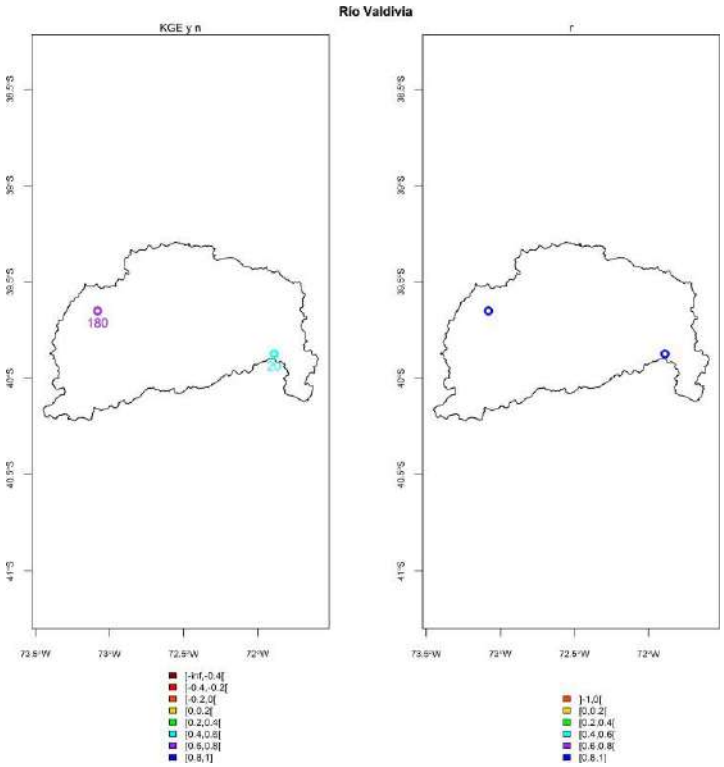


Figura 91. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores de sequía moderada desde la primavera 2007 al invierno 2008, y después se registra un periodo de sequía con algunas intermitencias entre la primavera 2010 e invierno 2014, donde se restablece una condición de normalidad (Figura 92). Cabe destacar el nivel severo y extremo de sequía que se generó entre durante varios meses del verano 2011, primavera 2012, invierno 2013 y sobretodo verano 2014 donde incluso se alcanzó un nivel de sequía extrema en mayo del mismo año. Las causas atribuibles a esta sequía es el efecto de la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa dentro de casi toda la cuenca, y el aumento generalizado de la ETP que es significativa en parte importante de la cuenca. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra una tendencia marcada de déficit moderado en la zona norte y valores severos para la zona sur de la cuenca.

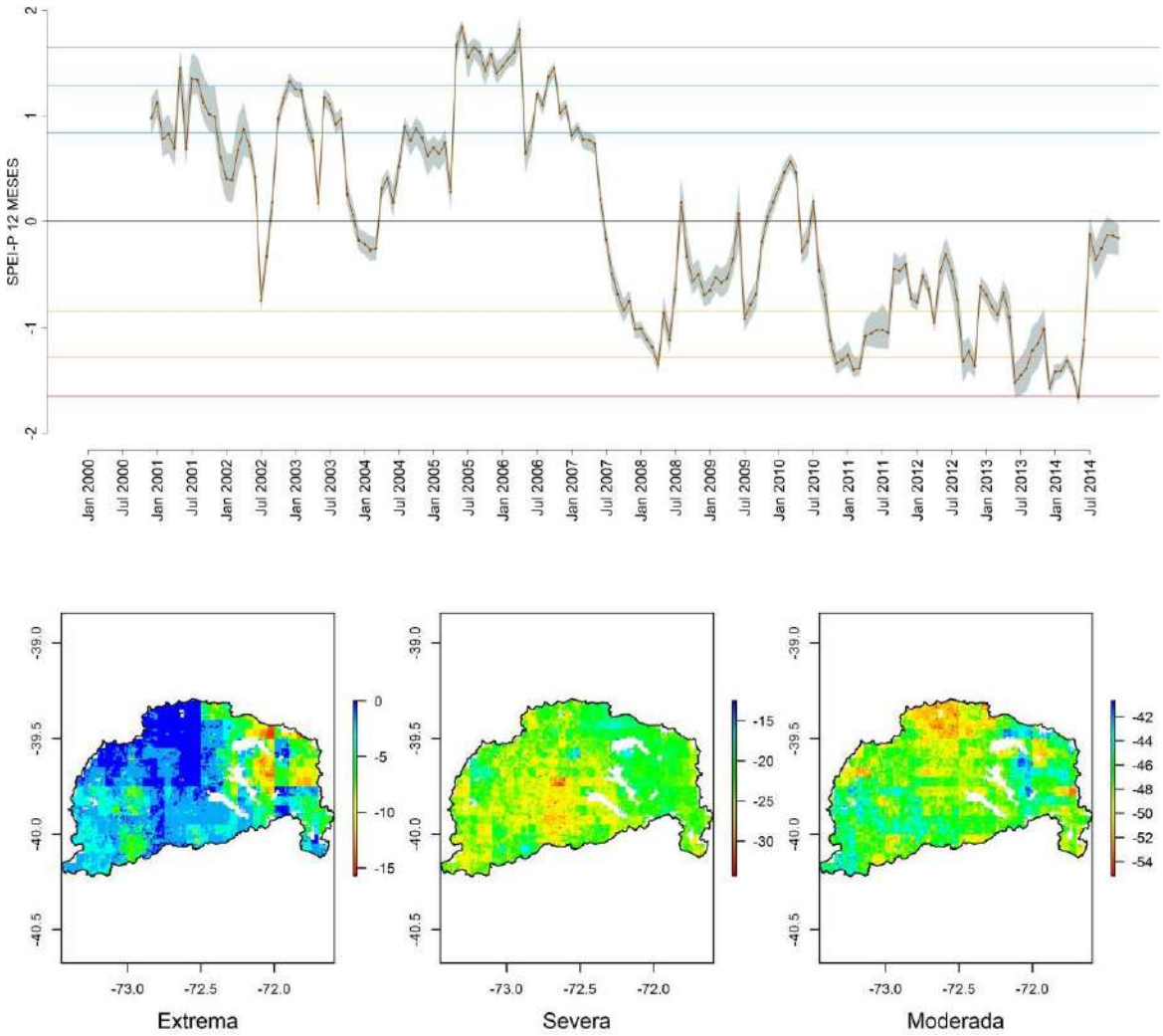


Figura 92. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta una marcada situación de déficit registrándose varios periodos con sequías severas y extremas. Este déficit se debe al efecto combinado del declive de las Pp y del aumento de las ETP. Pese a esta situación la mayoría de la cuenca no registra grandes variaciones en el consumo de agua habiendo un leve aumento de la ETR en casi toda la cuenca lo que se explica por el aumento de la ETP, fenómeno que podría estar incidiendo generando disminuciones de la escorrentía.

Región de los Lagos

La región de los Lagos es una extensa región compuesta por 11 cuencas donde muchas de ellas comparten parte de su superficie con territorio argentino. Estas cuencas presentan un variado patrón de sequía de acuerdo a su grado de severidad siendo por ejemplo la cuenca costera código 1009 la que presenta una magnitud de sequía extrema mayor, pero con el menor nivel de sequía acumulada de tipo moderada lo que demuestra la naturaleza puntual del fenómeno (Figura 93). En este sentido es marcada la diferencia que presenta la cuenca del río Maullín que registra la mayor magnitud de sequía moderada acumulada demostrando una tendencia de largo plazo del fenómeno. Esta cuenca se destaca por la presencia de un importante cuerpo de agua como es el lago Llanquihue.

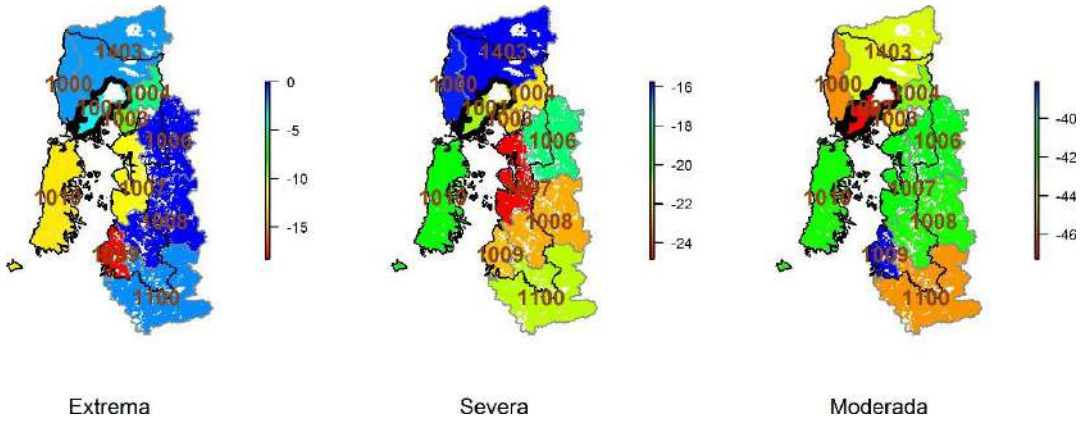


Figura 93. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de los Lagos, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca Rio Maullín (cod. 1001)

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso importante durante el año 2007 desde el cual se presenta un patrón irregular de subidas y bajadas hasta el 2014 (Figura 94). El descenso desde el año 2007 decae desde los 1800 mm hasta los 1600 mm durante los últimos años de estudio. La ETP presenta una tendencia leve al aumento durante el periodo de estudio con valores continuamente crecientes desde el año 2007 al 2014, donde resalta el año 2008 donde hubo valores de ETP muy superiores al resto de la serie. La ETR presenta una tendencia similar a la ETP. Estos resultados implican que el déficit está regulado por el efecto de la declinación de las precipitaciones por sobre modificaciones de la ETP.

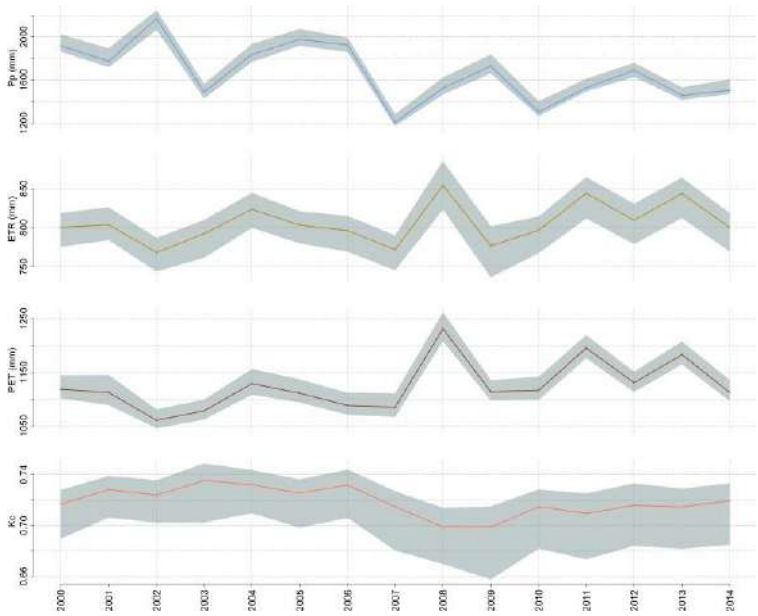


Figura 94. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un gradiente en las Pp con valores relativamente estables dentro de la cuenca habiendo una zona de menor Pp en el sector norte y una de mayor Pp en el sector sureste donde se encuentra la zona cordillerana (Figura 95). Se observa una marcada disminución de las precipitaciones en la cuenca durante los últimos dos quinquenios, la que se manifiesta de forma generalizada en todo el territorio. La ETP presenta un patrón de distribución homogéneo con valores mayores de ETP en la ribera sur y sureste del lago Llanquihue. Se observa un aumento muy leve de la variable durante los dos últimos quinquenios en particular en toda la cuenca. La ETR también presenta una distribución bastante homogénea siendo la zona cordillerana en torno al volcán Osorno donde hay menos vegetación la que presenta los menores valores. No se registran mayores cambios en la ETR durante el periodo de estudio.

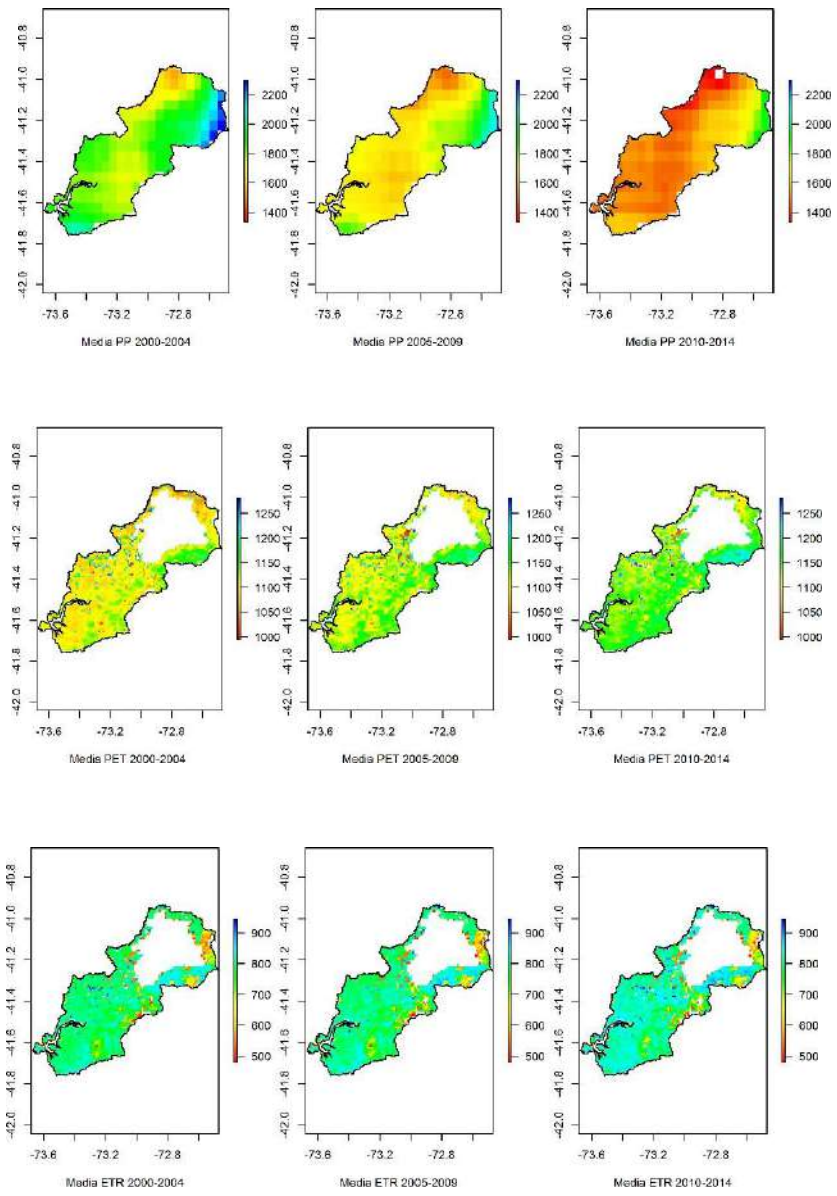


Figura 95. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de tendencias muestra disminuciones significativas de la Pp en la mitad de la cuenca, con valores negativos de tendencia en torno a los 25 a 45 mm de valor S de magnitud. La ETP muestra escasos valores significativos de tendencia con escasas excepciones en la zona noroeste de la cuenca donde se concentran una gran cantidad de usos de suelo antropicos. La ETR presenta pocos valores de cambio significativo, con un patron atomizado de dispersión, aunque se destacan valores de descenso de ETR en la zona sur del lago Llanquihue, entre las cuidades de puerto varas y puerto montt donde se

ha registrado un importante incremento imobiliario, lo que conlleva una disminucion de la vegetacion activa.

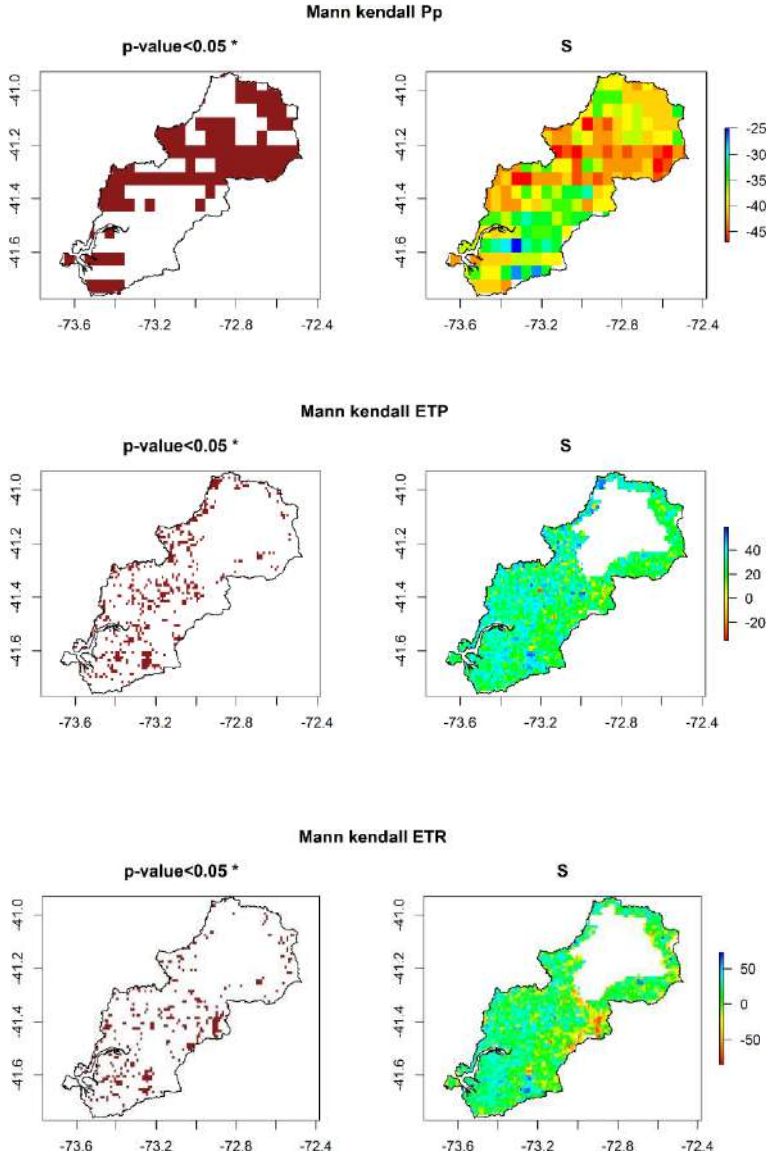


Figura 96. Figuras de tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con 3 estaciones con datos pluviométricos que cubren los extremos de la cuenca, con una serie temporal entre 82 y 180 meses (Figura 97). Todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,8 lo que habla de una adecuada precisión de las estimaciones. Los valores de KGE nos indican una aceptable exactitud de los datos sin sesgo al situarse la mayoría de los valores por sobre el rango de 0.6. Se puede concluir que los datos satelitales de precipitación pueden usarse de forma concreta para evaluar la magnitud y tendencia.

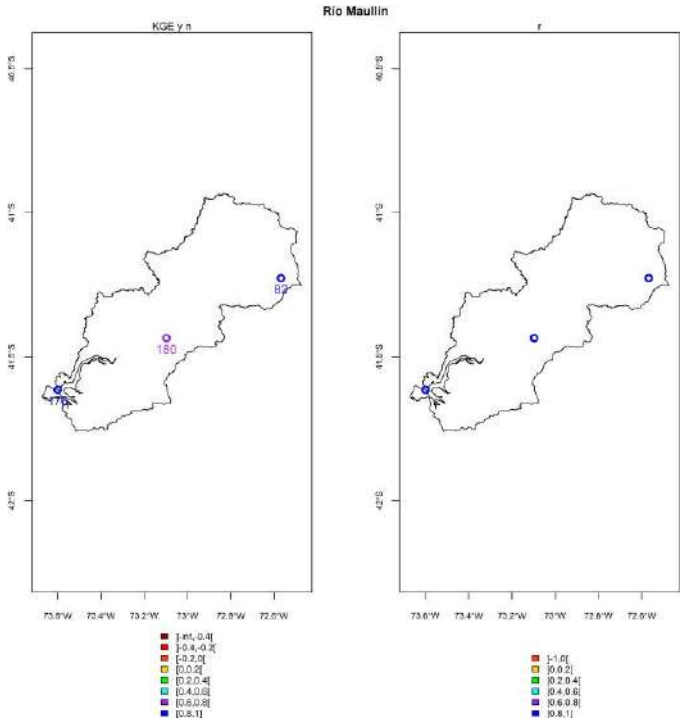


Figura 97. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta solo dos estaciones de comparación para ETP una con 180 valores y otra con 72 valores (Figura 98). La distribución espacial cubre la zona central y cordillerana de la cuenca. Los valores de correlación son precisos al estar en el rango entre 0,8 y 1, siendo el valor de KGE entre 0,6 y 0,8 lo que demuestra la consistencia de las observaciones satelitales. Se concluye que la cuenca presenta correctos para esta variable, tanto para evaluar las magnitudes y tendencias de esta variable, así como las tendencias de las métricas derivadas de esta variable.

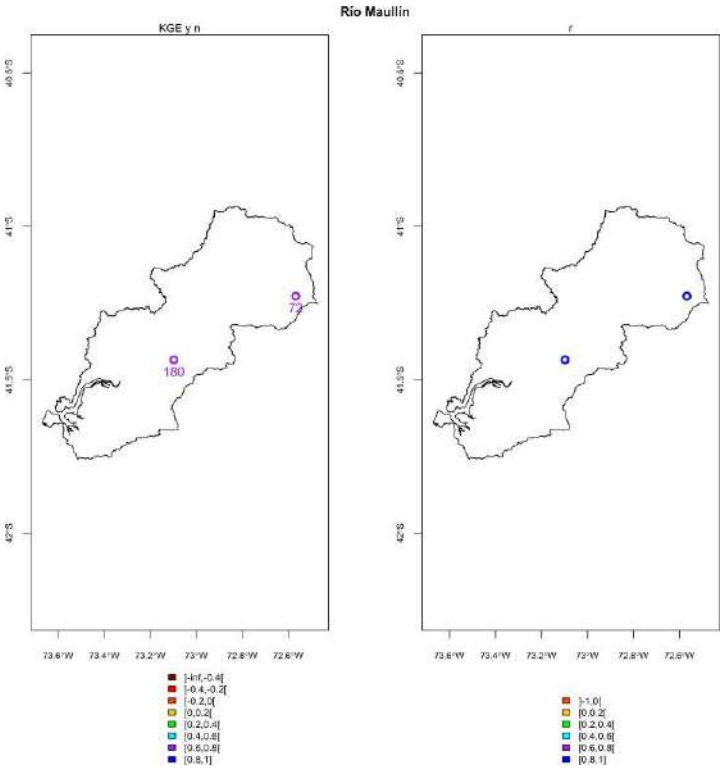


Figura 98. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores de sequía moderada desde invierno 2007 al invierno 2008, y después se registra un periodo con sequías intermitentes el invierno 2009, de la primavera 2010 a la primavera 2011, primavera 2012 y otoño e invierno 2014 (Figura 99). Cabe destacar el nivel extremo de sequía que se generó en abril 2008 y en mayo 2014. Las causas atribuibles a esta sequía es el efecto de la creciente declinación de las precipitaciones que es significativa en parte de la cuenca. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra valores similares de sequía moderada y severa para toda la cuenca.

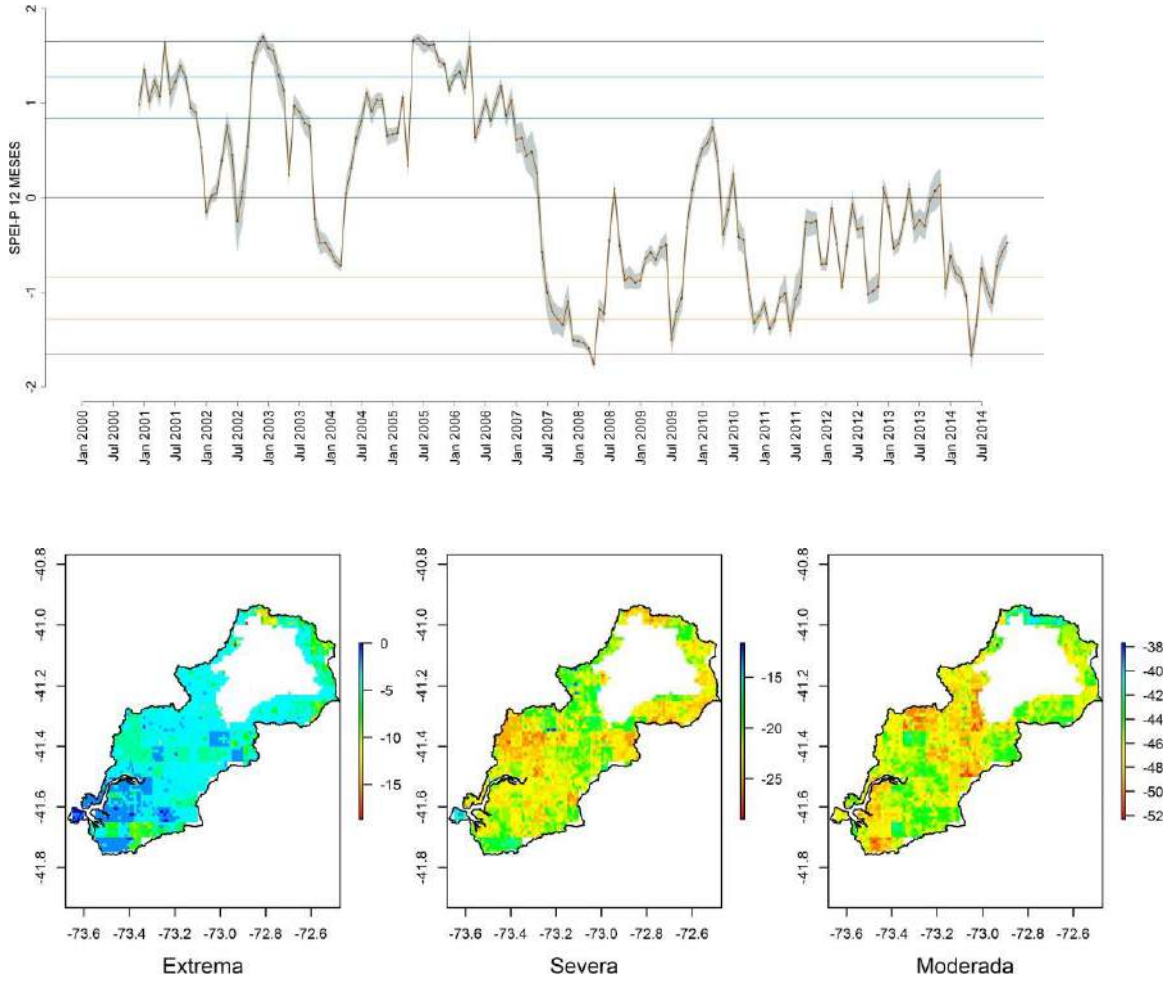


Figura 99. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta una situación de déficit marcada la que se debe a la consistente disminución de las Pp y al aumento de la ETP, siendo estas poco significativa y no significativa respectivamente. Esta condición genera un aumento generalizado, pero no significativo de la ETR, excepción de la zona sur del lago Llanquihue donde se registra un descenso probablemente debido a la importante expansión urbana de esa zona. Por ende se puede establecer que la cuenca puede estar experimentando un leve aumento del consumo hídrico lo que podría afectar a la escorrentía.

Región de Aysén

La región es muy extensa en superficie y posee abundantes zonas sin información, por exceso de nubes o por haber superficies con grandes extensiones de hielos. Se destaca los importantes niveles de sequía extrema y severa que presenta la cuenca compuesta de islas cod. 1102, la cual sufrió un importante periodo de déficit hídrico de más de 25 meses (Figura 100). No obstante estos resultados es la cuenca entre río Palena y el límite de la X región la que presenta mayor magnitud de sequía moderada

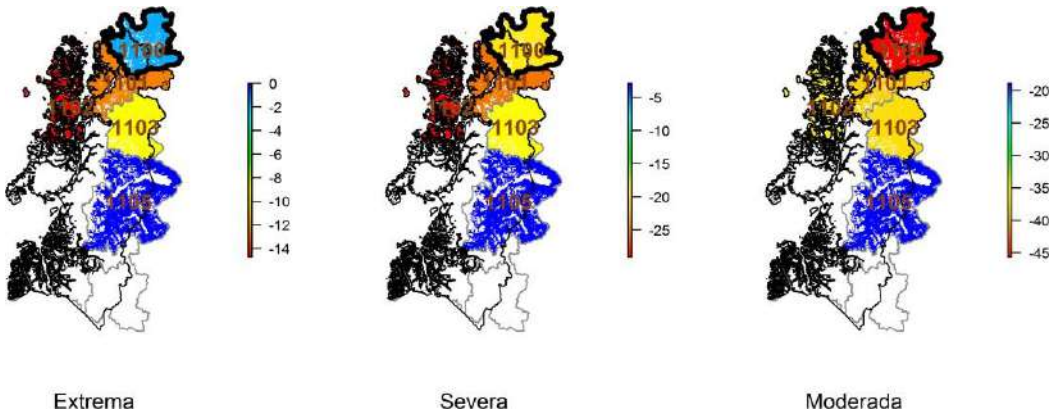


Figura 100. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Aysén, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca costera entre Río Palena y cuenca costera Limite X Región (cod. 1100).

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta diferentes variaciones de acuerdo a la variable que se evalúe. La precipitación registra un descenso leve durante el año 2007, años desde el cual mantiene niveles levemente inferiores de Pp hasta el 2014 (Figura 101). La ETP presenta una tendencia leve al aumento durante el periodo de estudio con valores continuamente crecientes desde el año 2006 al 2014, donde resalta el año 2008 donde hubo valores de ETP muy superiores al resto de la serie. La ETR presenta valores bastante estables. Estos resultados implican que el déficit está regulado por el efecto conjunto que incluye la variabilidad de la precipitación y la ETP.

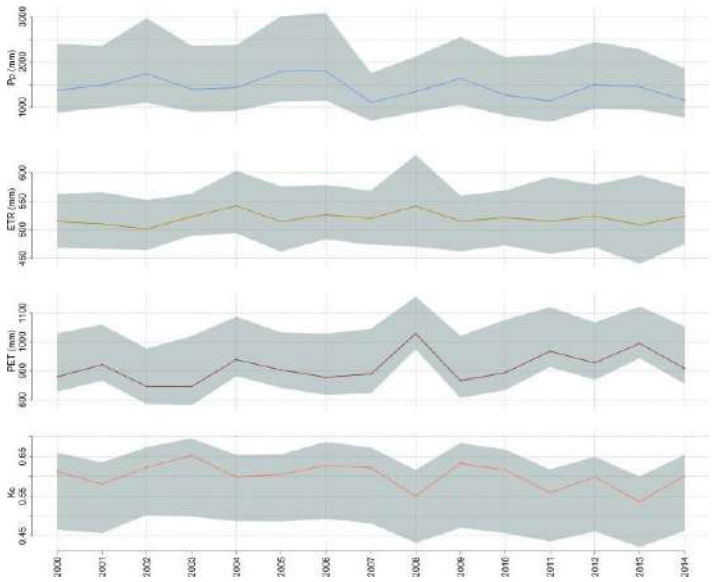


Figura 101. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

Las cuencas presentan un importante gradiente en las Pp con valores en torno a los 3000 mm anuales en la zona este, para llegar a los 500 mm en la zona oeste en el lado Argentino. Se observa una clara disminución de la Pp durante el último quinquenio, fuertemente marcada en la zona este de la cuenca (Figura 102). La ETP presenta un patrón de distribución donde se destacan claramente dos zonas, la zona este con valores bajos de radiación y la zona oeste con valores levemente mayores de acuerdo a la latitud donde se encuentra esta cuenca. Se observa un aumento muy leve de la variable durante el último quinquenio, el que se manifiesta en toda la cuenca. La ETR presenta una distribución bastante homogénea con valores que fluctúan entre los 400 y los 650 mm por año. Se aprecia un leve aumento de la variable en la zona este de la cuenca y mientras que en la zona este no se registran mayores cambios en la ETR durante el periodo de estudio.

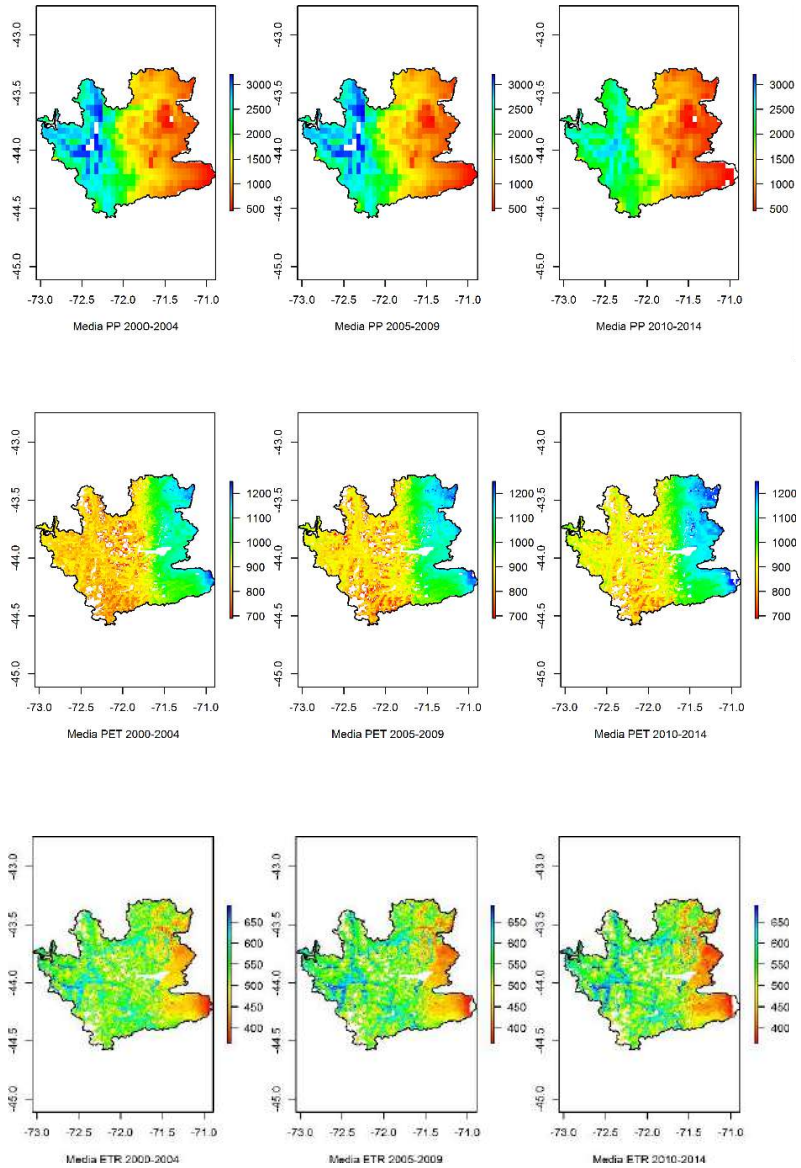


Figura 102. Cartografías de precipitación, ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

El análisis de Tendencias muestra uns tendencia generalizada a la disminución de las Pp con efectos significativos en acotados a la zona sur de la cuenca en la cercanias de Puerto Cisnes, con valores negativos de tendencia en torno a los 40 mm de valor S de magnitud (Figura 103). La ETP muestra una tendencia general al aumento, pero con pocos valores de tendencias significativos los que se encuentran distribuidos de forma aleatorea en su mayoría a excepción de la zona este de la cuenca en el sector Argentino donde se distingue una zona continua de cambios de aumentos significativos de la ETP. La ETR presenta un patron de aumento en toda la zona oeste de la cuenca en el sector Chileno, y por el contrario

una zona de tendencias negativas de ETR en el sector Argentino ubicado en el sector este con numeros sectores de tendencia significativa en el extremo este.

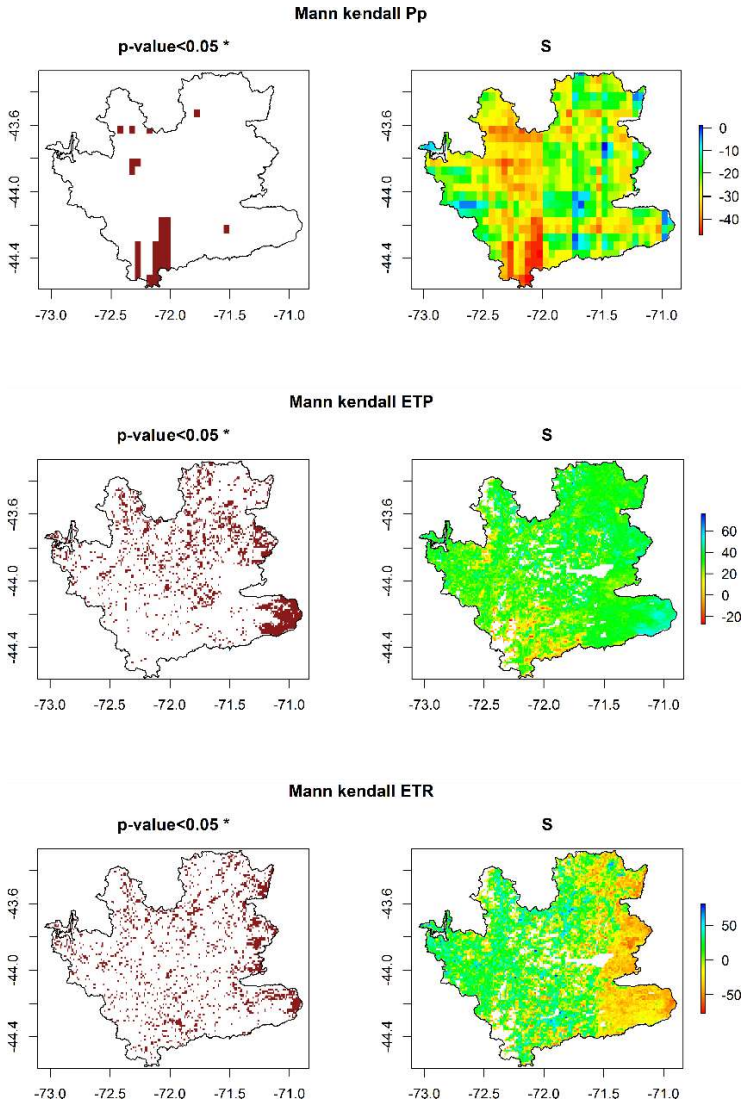


Figura 103. Figuras de tendencias anuales de la precipitación, evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm por 15 años.

Evaluación de productos satelitales

Precipitación

La cuenca cuenta con 8 estaciones con datos pluviométricos que cubren la zona este de la cuenca, con una serie temporal entre 9 y 170 meses con 6 estaciones de más de 100 datos (Figura 104). Todas las estaciones presentan un valor de correlación superior a 0,6 lo que habla de una correcta precisión de las estimaciones. Los valores de KGE nos indican una aceptable exactitud de los datos sin sesgo al situarse la mayoría de los valores por sobre el rango de 0,4. Se puede concluir que los datos satelitales de precipitación pueden usarse de forma concreta para evaluar la magnitud y tendencia de la variable.

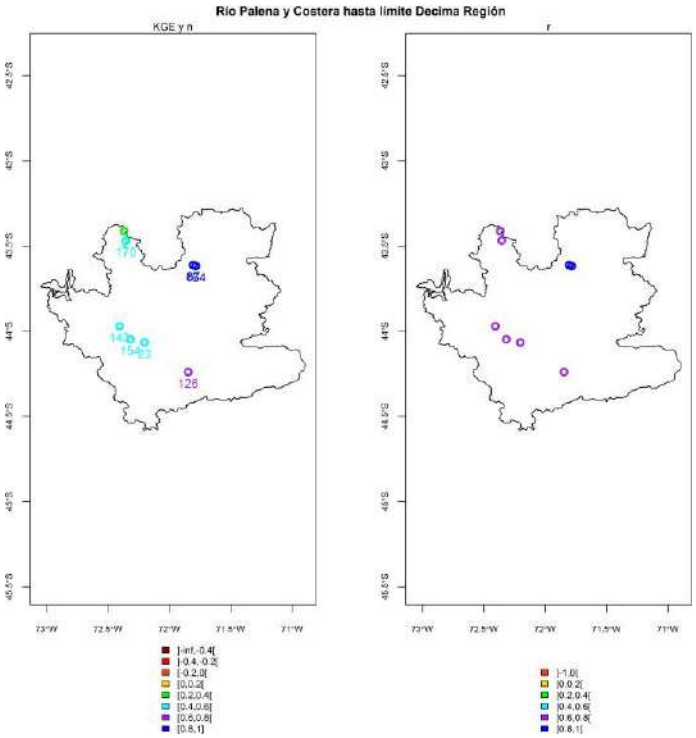


Figura 104. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de precipitación. A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta solo tres estaciones de comparación para ETP una con 65, 104 y 116 valores (Figura 105). La distribución espacial cubre varios sectores de la cuenca con una adecuada representatividad espacial. Los valores de correlación son precisos al estar en el rango entre 0,8 y 1, siendo el valor de KGE entre 0,8 y 1 lo que demuestra la consistencia de las observaciones satelitales. Se concluye que la cuenca presenta correctos para esta variable, tanto para evaluar las magnitudes y tendencias de esta variable, así como las tendencias de las métricas derivadas de esta variable.

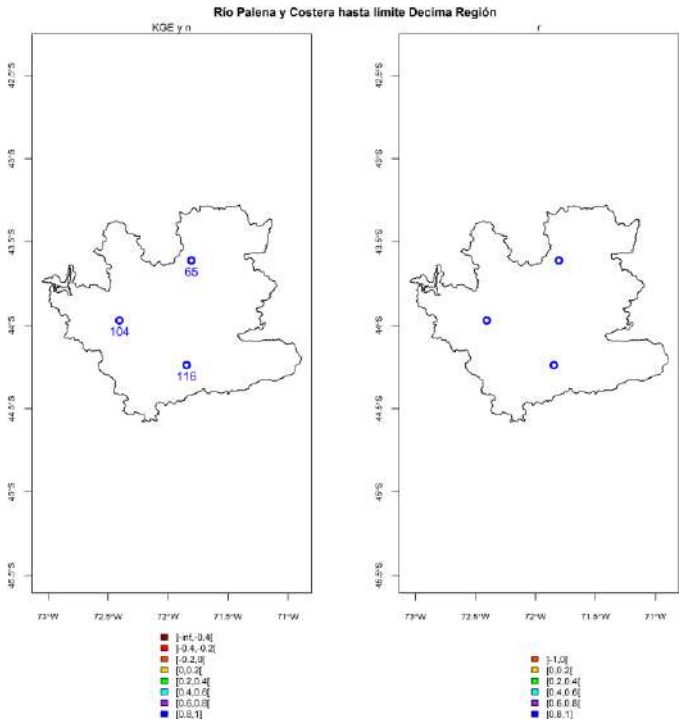


Figura 105. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra valores de sequía moderada desde noviembre 2007 a junio 2008, y después se registra un periodo con sequías intermitentes el primavera 2008, e invierno 2009. Posteriormente se registra un periodo de superávit hasta diciembre 2010, para posteriormente entrar en un periodo de sequía hasta la primavera 2013 (Figura 106). Posteriormente nuevamente se vuelve a un periodo normal hasta mayo 2014 donde se entra nuevamente en un periodo de sequía hasta el final del periodo de estudio en diciembre 2014. Se destacan los 3 meses de años diferentes, marzo 2008, abril 2012 y septiembre 2014 donde se alcanzó niveles de sequía extrema. Las causas atribuibles a esta sequía es el efecto de la creciente declinación de las precipitaciones que fue significativa sobretodo en la parte sur de la cuenca. La distribución espacial del déficit evaluado por SPEI muestra valores elevados de sequía extrema en la zona costera de la cuenca, valores elevados de sequía severa en la zona este y valores elevados de sequía moderada en la zona este y sur de la cuenca, aludiendo a una distribución espacial desigual de la sequía.

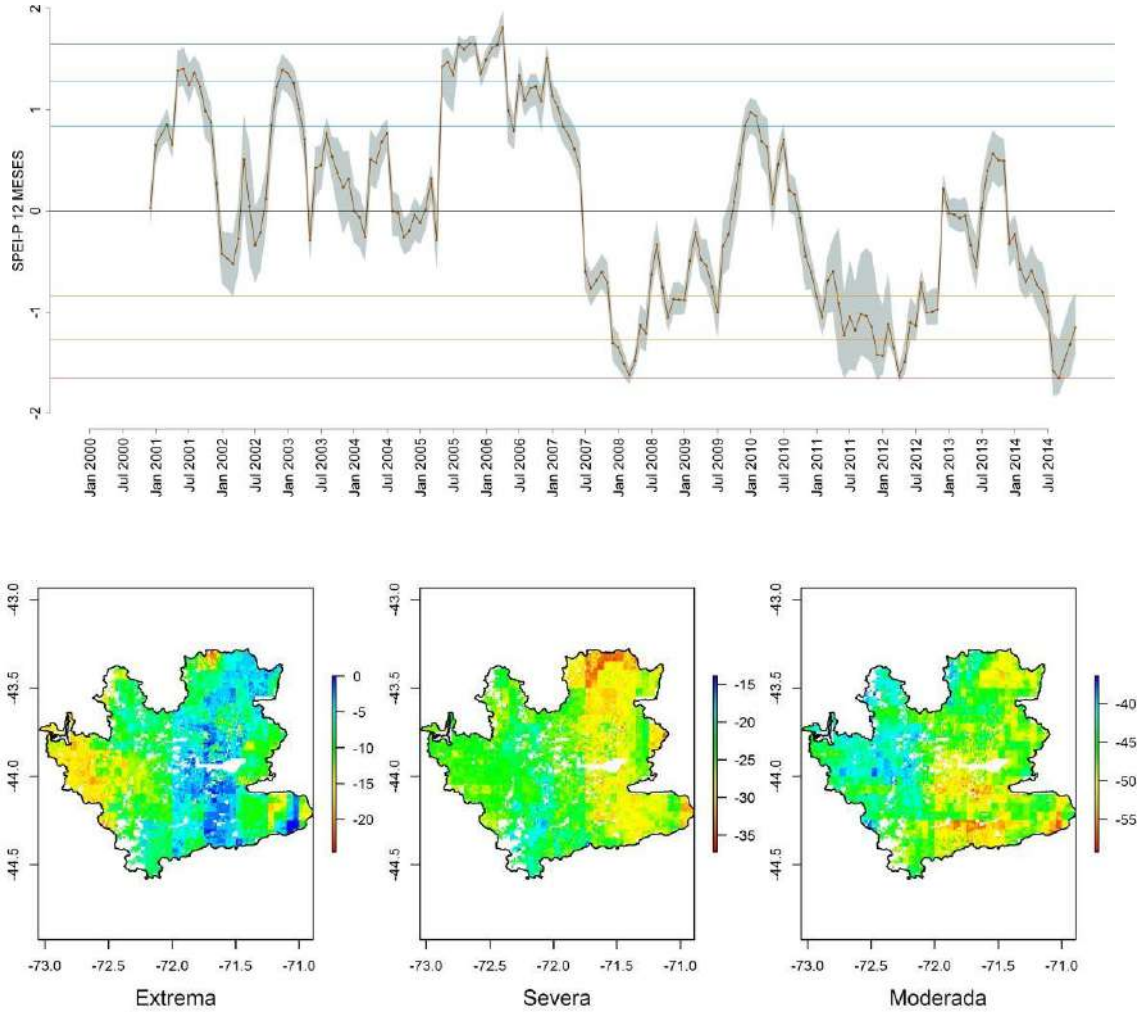


Figura 106. Arriba: Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP (parte alta), donde se representa el valor promedio de la cuenca y la rango intercuartílico de la distribución de valores en tonos grises. Las líneas amarillas, naranjas y rojas corresponden a los umbrales de sequía moderada, severa y extrema respectivamente. Abajo: Cartografía de valores de magnitud de SPEI basados en ETP de acuerdo al criterio de sequía extrema, severa y moderada.

Resumen

La cuenca presenta una situación de déficit acumulado importante el cual se manifiesta de forma desigual dentro de la cuenca, pero no registra mayores tendencias significativas a la baja de la Pp o al aumento de la ETP. Solo la zona este de la cuenca en el lado Argentino presenta aumento de la ETP, lo que ocasiona disminuciones de la ETR debido al bajo aporte pluvial natural de la zona.

Región de Magallanes

La región de Magallanes es una extensa región que presenta en su zona norte una ausencia de datos dado la condición de nubosidad constante y de campos de hielos que cubren extensas partes de la región. Dentro de las cuencas que se encuentran en la región hay niveles bajos de déficit, siendo la cuenca de Ensenada de Torino y Punta Dugeness (cod. 1205), la que presenta las mayores magnitudes de sequía moderada así como también de magnitud severa (Figura 107). Cabe recordar que para esta zona del país no se cuenta con datos de precipitación espacialmente explícitos provenientes de datos satelitales, por lo que no se puede evaluar el déficit hídrico de forma espacialmente explícita.

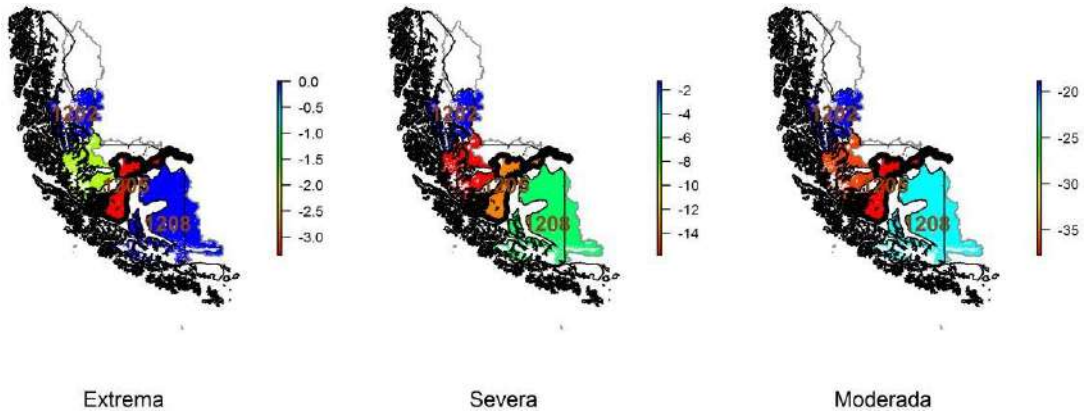


Figura 107. Evaluación de la magnitud de déficit hídrico en la región de Magallanes, obtenido de acuerdo al indicador SPEI obtenido con efecto memoria de 12 meses.

Variables meteorológicas de la Cuenca Ensenada de Torino y Punta Dugeness

Variaciones anuales

La serie temporal de las variables presenta comportamientos relativamente similares entre variables. La precipitación registra un descenso un comportamiento variable pero sin tendencias marcadas habiendo alrededor de 350 mm de Pp anual (Figura 108). La ETP presenta un comportamiento variable con algunos periodos de mayor ETP como el año 2004 y el 2011 así periodos de menor ETP como el año 2007 y 2014 sin observarse un aumento durante el periodo de estudio. La ETR presenta valores bastante estables y muy similares a la ETP de acuerdo a las condiciones climáticas de la región donde la demanda atmosférica controla en gran medida el consumo de agua. Estos resultados implican que el déficit está regulado las variaciones en la demanda de la atmosfera (ETP) por sobre las variaciones de la precipitación.

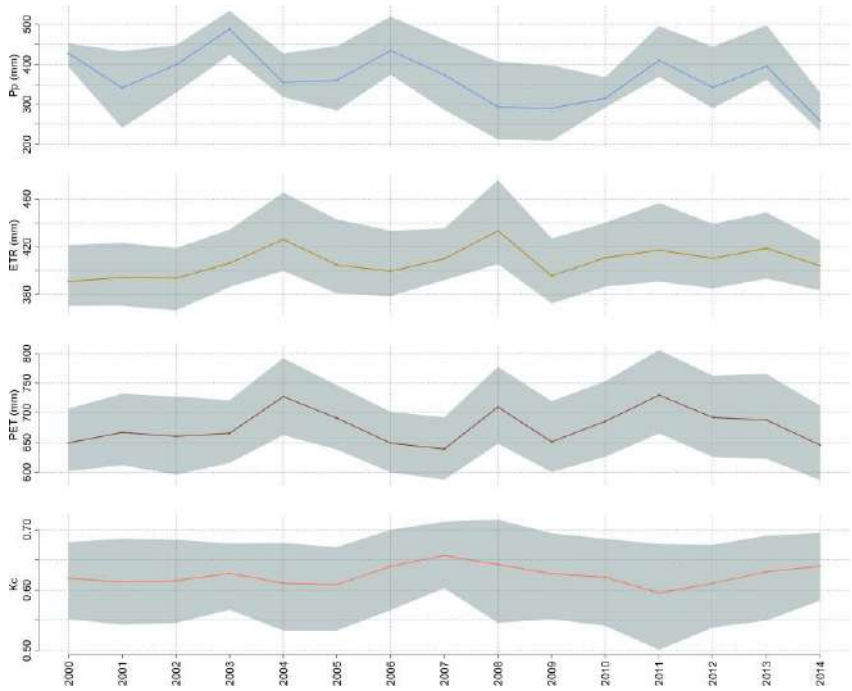


Figura 108. Variaciones a escala anual de las variables Precipitación (Pp), Evapotranspiración real (ETR), Evapotranspiración potencial (ETP), y Kc definido como ETR/ETP. En gris se representan el primer y tercer cuartil de los valores observados dentro de la cuenca.

<u>Quinquenios</u>

La ETP presenta un patrón de distribución donde se destacan claramente tres zonas, con valores crecientes de ETP de oeste a este, con variaciones entre los 400 y 900 mm (Figura 109). No se observan mayores variaciones durante el periodo de estudio a excepción de la zona oeste donde aumenta la ETP. La ETR presenta una distribución bastante homogénea con valores que fluctúan entre los 300 y los 500 mm por año, con valores inferiores en la zona este de la cuenca y valores superiores de ETR en la zona central de la cuenca al sur de la ciudad de Punta Arenas donde se encuentras algunos bosques de *Nothofagus*. No se registran mayores cambios en la ETR durante los quinquenios evaluados en el periodo de estudio.

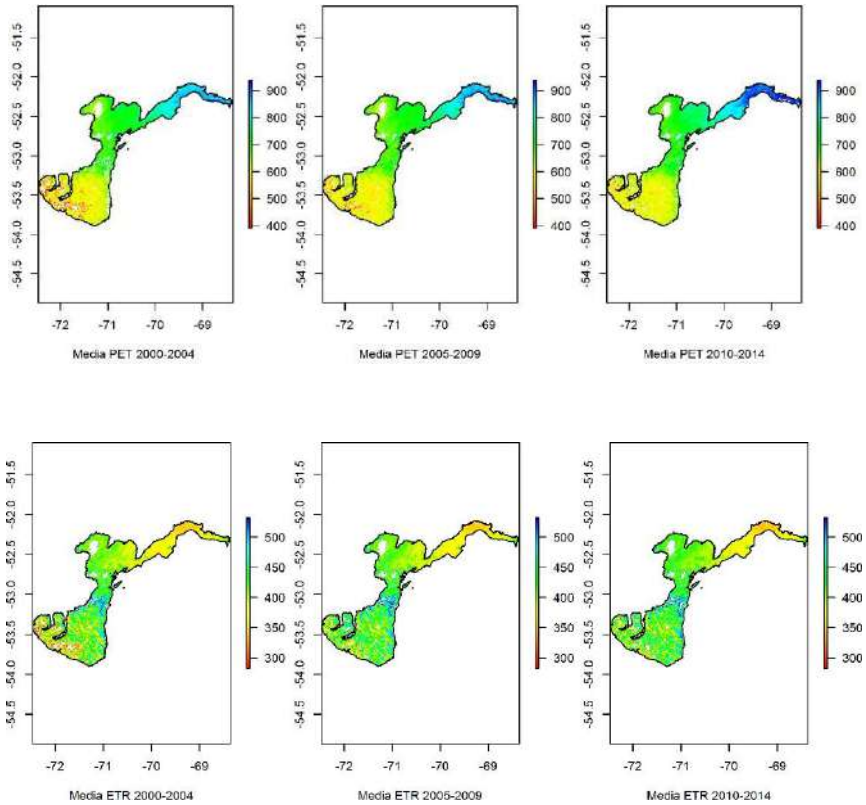


Figura 109. Cartografías de ETP y ETR media anual agrupadas por quinquenios, en mm por año.

Tendencias de las variables hidrológicas

La ETP muestra una tendencia generalizada de aumento de la ETP pero muestra muy escasos valores significativos de tendencia con escasas excepciones en la zona noreste de la cuenca, donde existe una zona cubierta por estepas patagonicas (Figura 110). La ETR presenta muchos mas valores de cambio significativo, los que presentan un aumento del orden de los 40 a 60 mm de valor S de magnitud y se concentran en la zona centro norte de la cuenca, sector que concentra grandes estancias ganaderas con praderas. Este aumento del consumo hídrico puede estar obedeciendo a mejores estrategias de manejo de las praderas, lo que se refleja en la mayor actividad de las plantas que sostienen este aumento significativo de la ETR.

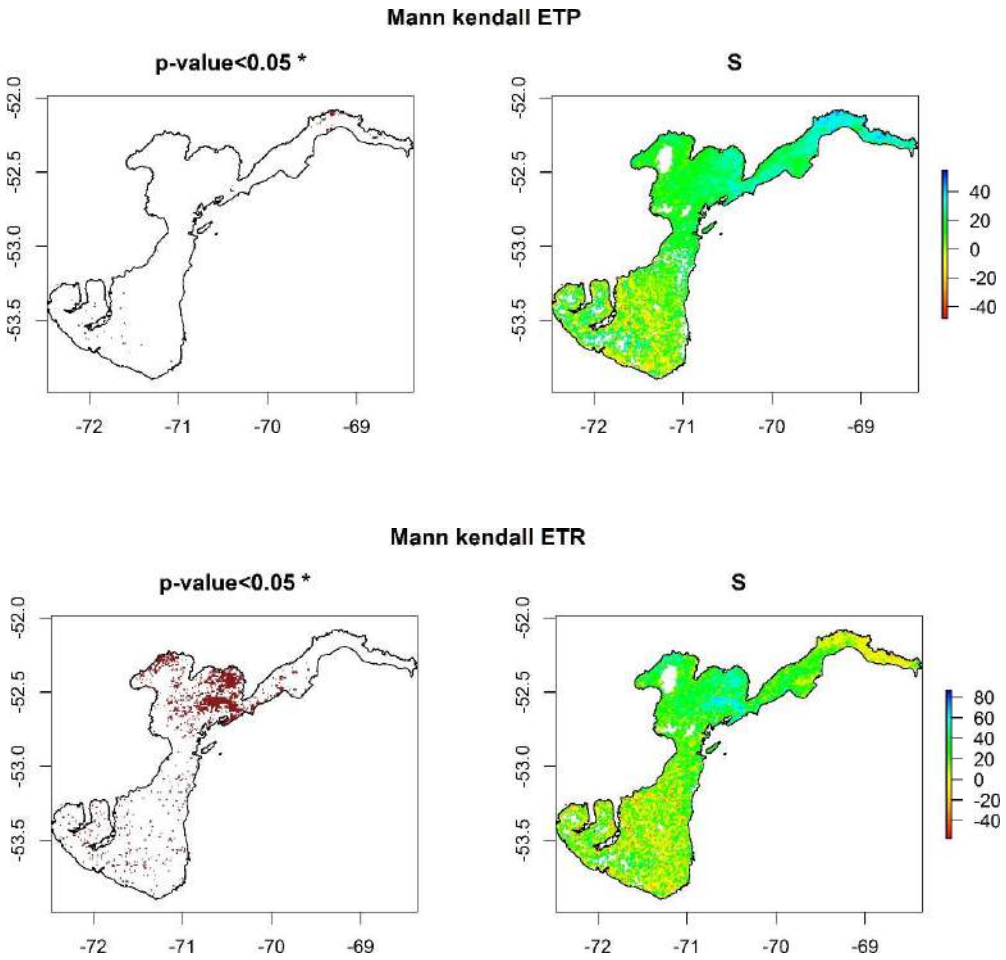


Figura 110. Figuras de tendencias anuales de la evapotranspiración potencial y real evaluada a partir del método de Mann-Kendall. Las figuras de la izquierda presentan la distribución espacial de aquellos sectores que presentaron diferencias significativas en su tendencia y las de la derecha representan el valor S de magnitud de la tendencia para cada pixel, siendo los valores positivos tendencias positivas y aquellos negativos tendencias negativas en mm/año).

Evaluación de productos satelitales

Evapotranspiración Potencial

La cuenca presenta solo tres estaciones de comparación para ETP con 69, 80 y 171 valores. La distribución espacial cubre varios sectores de la cuenca pero concentrados en la zona central (Figura 111). Los valores de correlación son precisos al estar en el rango entre 0,8 y 1, siendo el valor de KGE es adecuado al estar entre 0,6 y 1 lo que demuestra la consistencia de las observaciones satelitales. Se concluye que la cuenca presenta correctos para esta variable, tanto para evaluar las magnitudes y tendencias de esta variable, así como las tendencias de las métricas derivadas de esta variable.

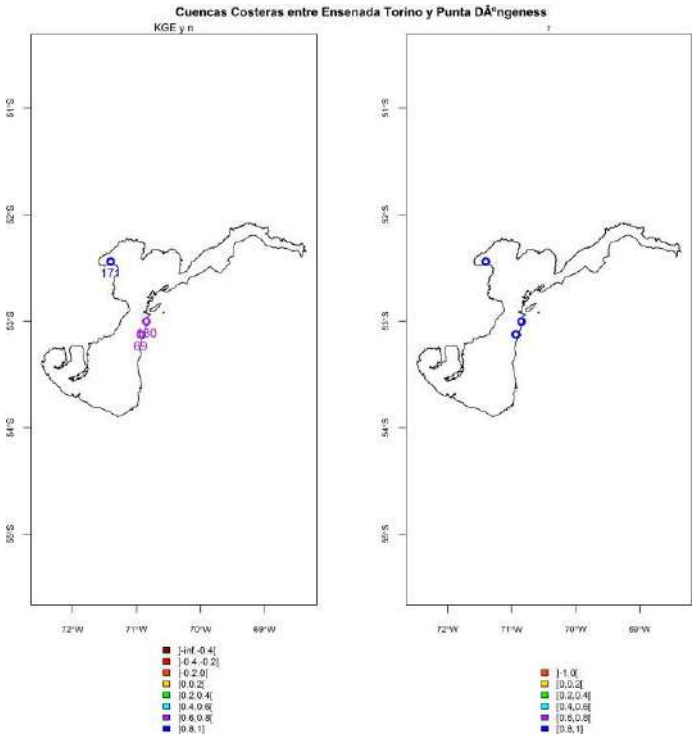


Figura 111. Evaluación de la exactitud de los productos satelitales de evapotranspiración potencial (ETP). A la izquierda se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal (r), mientras que a la derecha se presenta el valor del índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE), en esta figura además se incluye el número de observaciones mensuales consideradas (n).

Déficit hídrico

SPEI-12 basado en ETP

El índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra una serie temporal sumamente variable con 6 períodos de déficit hídrico en verano-otoño 2002 alcanzando valores de sequía extrema, verano 2005 con déficit moderado, otoño 2008, verano 2009 y primavera-verano 2011 y primavera 2012, por otro lado se registra un periodo de normalidad desde el 2012 a fines del 2014. Este comportamiento nos indica la ausencia de una tendencia marcada al déficit, lo que estaría obedeciendo a patrones naturales de déficit hídricos periódico, los que usualmente son acompañados por periodos de superávit

en los años 2001, 2003, 2006-2008, 2013-2014, tal cual se demuestra en la serie temporal que describe el SPEI.

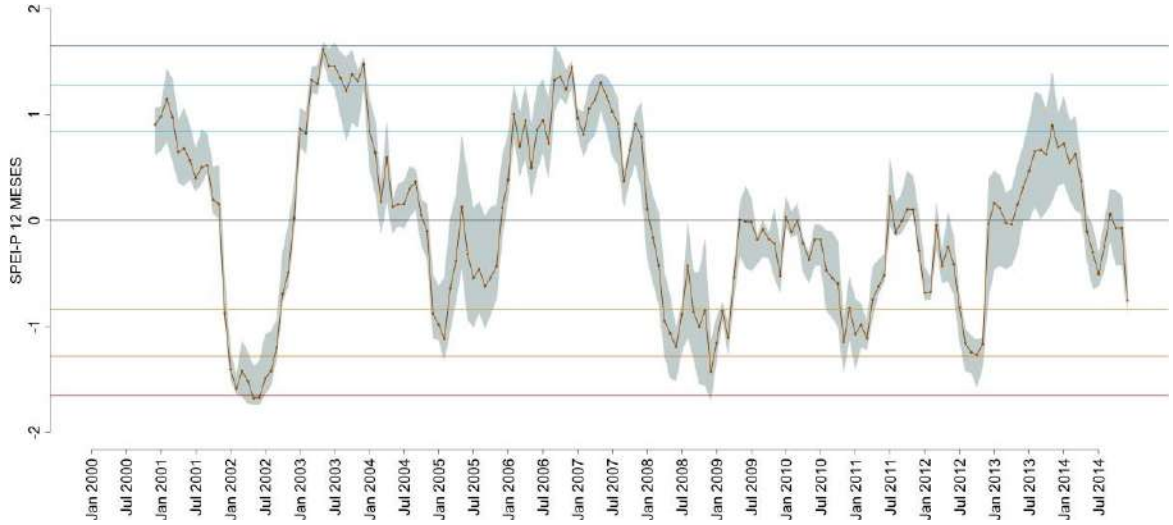


Figura 112. Serie temporal de SPEI-12 basados en ETP.

Resumen

La cuenca no presenta una situación marcada de déficit, habiendo periodos alternados de superávit y déficit, sin tendencias significativas de cambio para ninguna variable.

Análisis del déficit hídrico por cobertura de suelos

Coberturas de la cuenca del Maule

La cuenca del Maule está constituida por variadas coberturas de usos de suelo, presentando la mayor parte de su superficie cubierta por matorrales (29%), cultivos (21%), suelo desnudo (16,8%), bosque nativo (14,8%), plantaciones forestales (12,8%) y pastizales (4,8%) y otras clases en mucha menor proporción (Figura 113). La mayoría de los matorrales se ubican en la zona centro oeste de la cuenca y en la cordillera de los Andes, el bosque nativo esta relegado a la zona pre-cordillerana principalmente donde co-existe con plantaciones forestales y también se encuentra presente en algunos escasos remanentes en la zona oeste, donde coexisten con una matriz dominada por plantaciones forestales. Los cultivos se concentran en la zona central de la cuenca.

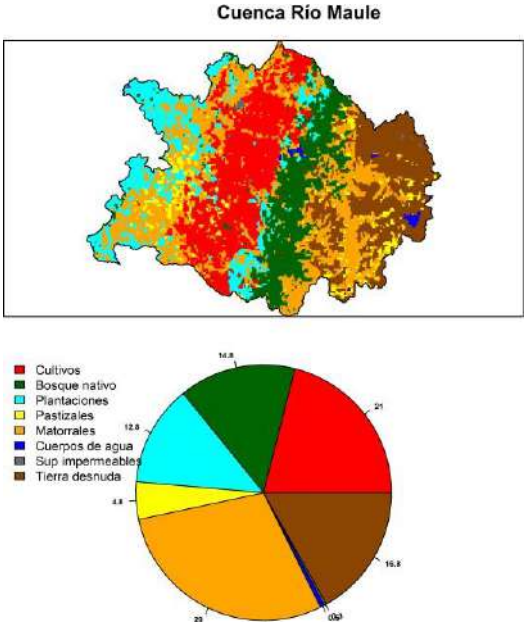


Figura 113. Cartografía de coberturas de suelo para la cuenca de Maule (arriba), y gráfico de torta de las coberturas y su porción (en %) dentro de la cuenca.

Análisis de las variables hidrológicas por uso de suelo.

Para este análisis se consideraron únicamente las coberturas más abundantes e importantes descartando los suelos desnudos. Se seleccionaron para el análisis las clases Matorral, Bosque Nativo, plantaciones forestales y cultivos. Se observa en la Figura 114, que la precipitación tiene una tendencia a la disminución significativa generalizada con una disminución entre los 40 y los 65 mm de tendencia en los últimos 15 años.

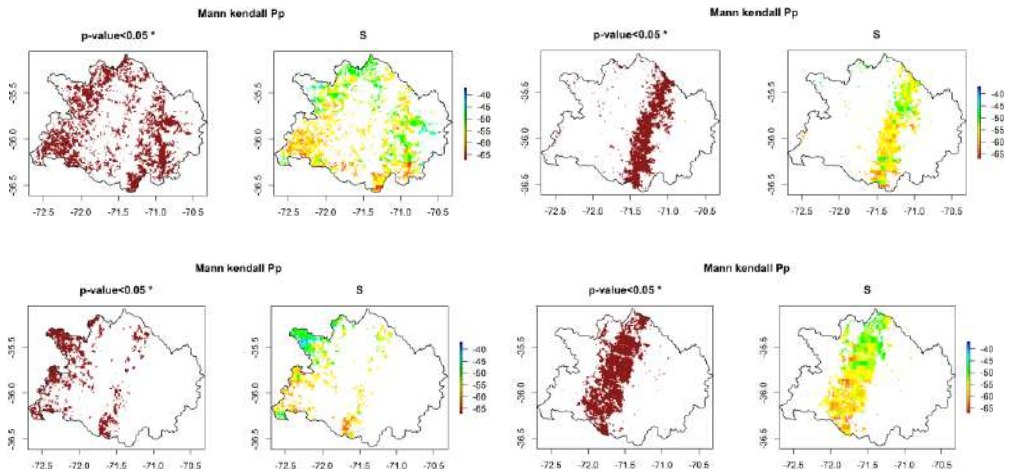


Figura 114. Análisis de tendencias de la Pp por cobertura de suelo ordenados de arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha siguiendo el sentido del reloj (matorrales, bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos). Se presenta la significancia de la tendencia en las figuras de la izquierda donde en rojo se presentan los valores significativos y los mapas en colores representan el valor S de tendencia en mm para el periodo de 15 años.

La ETP aumenta de forma significativa en todas las coberturas (Figura 115) ilustrando los efectos del aumento de la temperatura del aire producto del cambio climático lo que aumenta la sequedad de la atmósfera lo que podría repercutir en la vegetación. Este escenario hace suponer una condición de estrés en la vegetación lo que se condice con incendios registrados en la zona, como por ejemplo el mega-incendio registrado a fines de enero 2017, el cual tuvo lugar en la zona oeste de la cuenca.

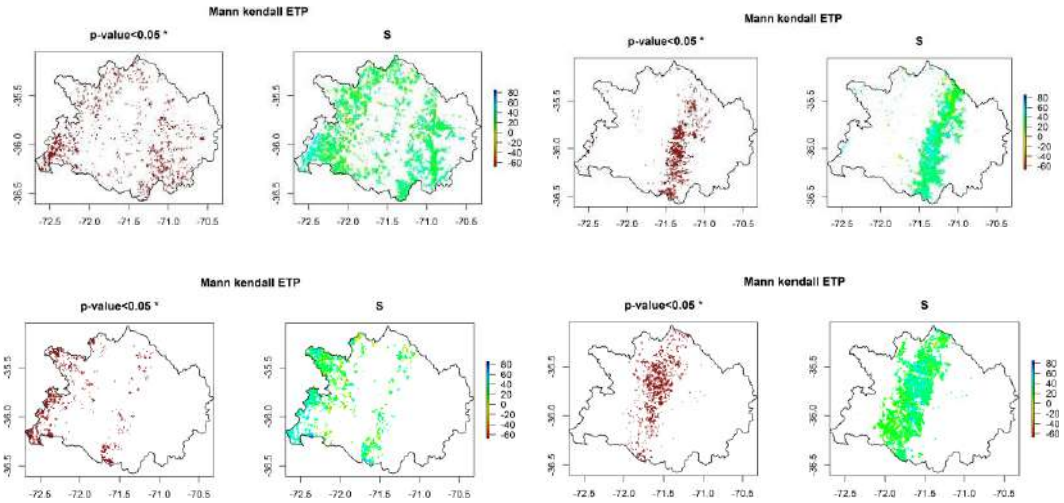


Figura 115. Análisis de tendencias de la ETP por cobertura de suelo ordenados de arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha siguiendo el sentido del reloj (pastizales, bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos). Se presenta la significancia de la tendencia en las figuras de la

izquierda donde en rojo se presentan los valores significativos y los mapas en colores representan el valor S de tendencia en mm para el periodo de 15 años.

En general en la zona el consumo de agua, expresado como ETR, se ha manifestado de diversas formas de acuerdo a la cobertura de suelo. Por ejemplo los matorrales presentan cambios significativos con aumentos en la zona costera y disminuciones importantes en la zona pre-cordillerana (Figura 116). El bosque nativo registra una disminución de la ETR significativa en su mayoría mientras que las plantaciones forestales presentan en líneas generales un significativo aumento de la ETR que puede llegar a 100 mm de valor S de magnitud de la tendencia producto del crecimiento de la biomasa forestal, mientras que los cultivos presentan un comportamiento variable habiendo diferencias significativas tanto positivas como negativas, lo que asocia a cultivos estresados por falta de agua o cultivos con mayor consumo de agua dado el aumento de la demanda de la atmósfera.

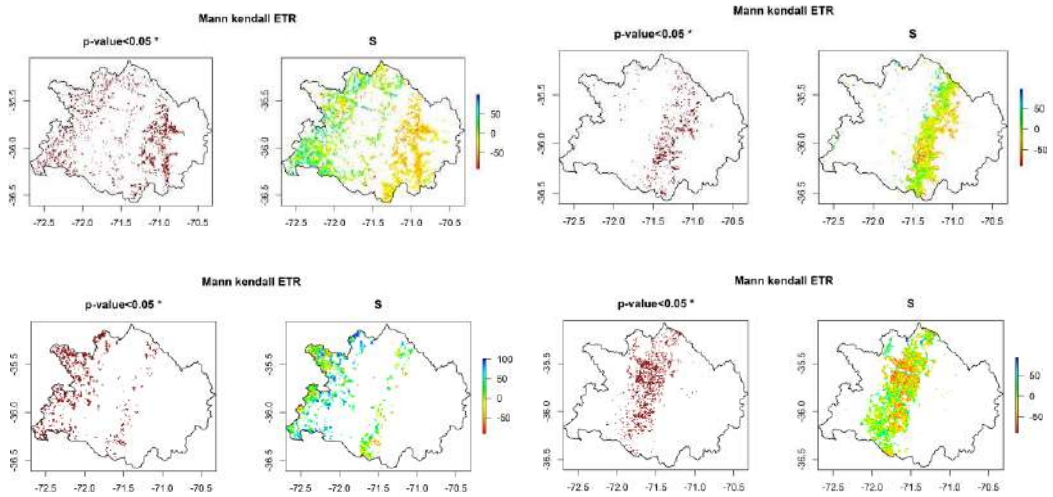


Figura 116. Análisis de tendencias de la ETR por cobertura de suelo ordenados de arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha siguiendo el sentido del reloj (matorrales, bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos). Se presenta la significancia de la tendencia en las figuras de la izquierda donde en rojo se presentan los valores significativos y los mapas en colores representan el valor S de tendencia en mm para el periodo de 15 años.

Resumen

Las coberturas de suelos presentaron un patrón común de disminución de Pp y de aumento de ETP, sin embargo la respuesta en términos de consumo de agua o ETR, fue disímil dentro de la cuenca registrándose una situación de estrés hídrico en los matorrales y bosques nativos, mientras que las plantaciones forestales se ven favorecidas por la situación climática registrada al haber un aumento de la ETR, lo que se condice con las dinámicas de manejo forestal existente. La zona agrícola presenta cambios positivos y negativos en su consumo de acuerdo al tipo de sistema de riego existente.

Análisis del déficit hídrico por cobertura de suelos

Coberturas de la cuenca Imperial

La cuenca de Imperial está constituida por variadas coberturas de usos de suelo, presentando la mayor parte de su superficie cubierta por pastizales (39,4%) y bosque nativo (25,3%), plantaciones (16,3%) y cultivos (15,6%) y otras clases en mucha menor proporción (Figura 117). La mayoría de los pastizales se ubican en la zona centro y suroeste de la cuenca, el bosque nativo esta relegado a la zona cordillerana principalmente con algunos remanentes en la zona este, donde coexisten con una matriz dominada por plantaciones forestales y cultivos los cuales se concentran en la zona norte del valle central principalmente.

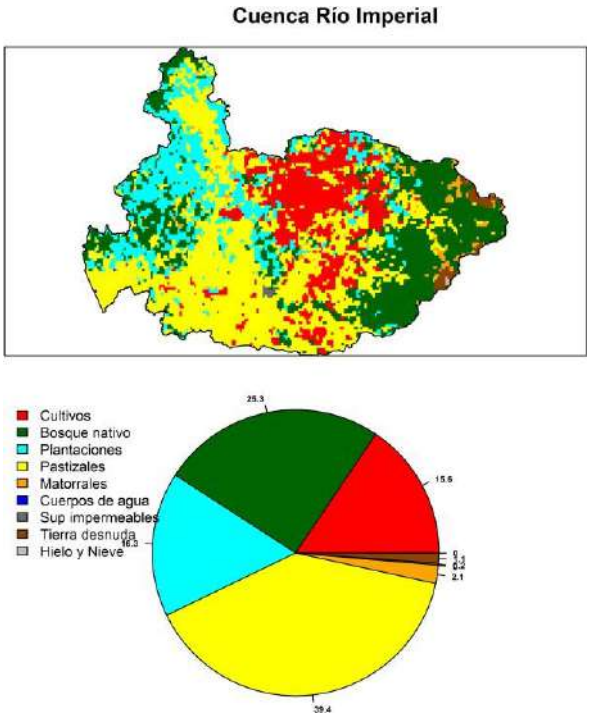


Figura 117. Cartografía de coberturas de suelo para la cuenca del río Imperial (arriba), y gráfico de torta de las coberturas y su porción (en %) dentro de la cuenca.

Análisis de las variables hidrológicas por cobertura de suelo

Para este análisis se consideraron únicamente las coberturas más abundantes que corresponden a pastizales, bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos. Se observa en la Figura 118, que la precipitación tiene una tendencia a la disminución significativa generalizada con mayor incidencia en la cordillera afectando a los bosques nativos de la zona.

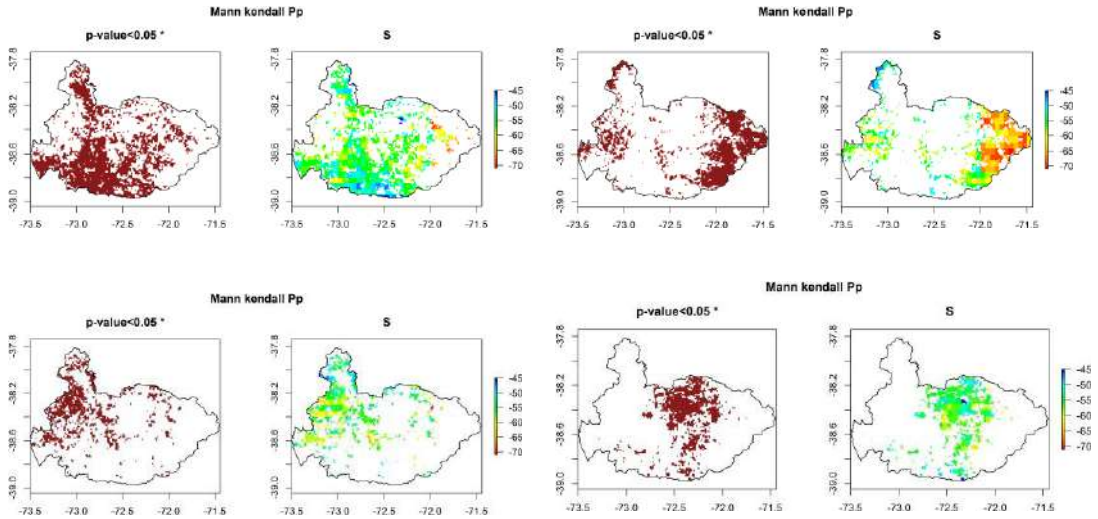


Figura 118. Análisis de tendencias de la Pp por cobertura de suelo ordenados de arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha siguiendo el sentido del reloj (pastizales, bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos). Se presenta la significancia de la tendencia en las figuras de la izquierda donde en rojo se presentan los valores significativos y los mapas en colores representan el valor S de tendencia en mm para el periodo de 15 años.

La ETP aumenta de forma significativa en todas las coberturas (Figura 119) ilustrando los efectos del aumento de la temperatura del aire producto del cambio climático lo que afecta la capacidad de la atmosfera de demandar agua. Este escenario hace suponer una condición de estrés en la vegetación lo que se condice con incendios registrados en la zona, como por ejemplo el de la reserva nacional China Muerta durante el año 2015, el cual tuvo lugar en la zona cordillerana de la cuenca.

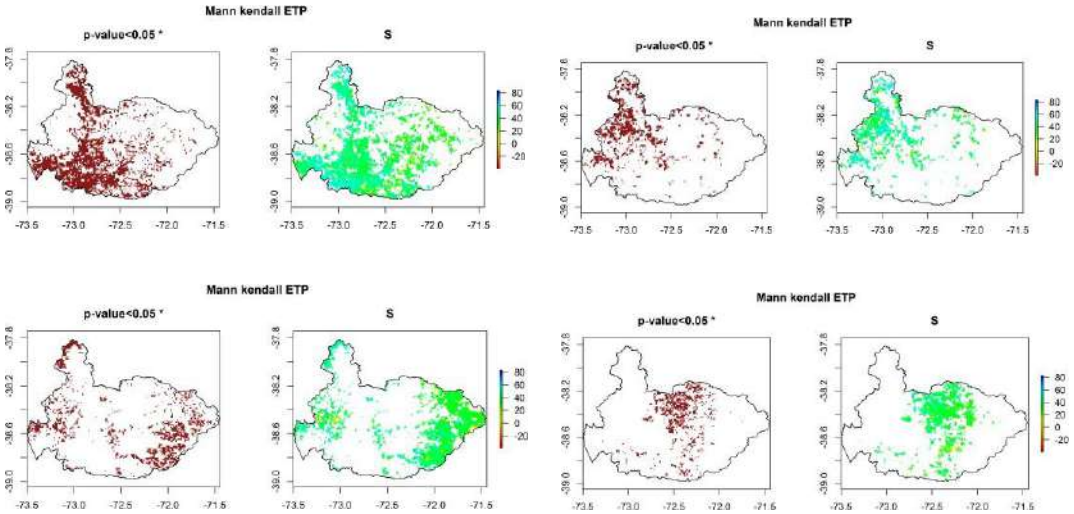


Figura 119. Análisis de tendencias de la ETP por cobertura de suelo ordenados de arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha siguiendo el sentido del reloj (pastizales, bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos). Se presenta la significancia de la tendencia en las figuras de la

izquierda donde en rojo se presentan los valores significativos y los mapas en colores representan el valor S de tendencia en mm para el periodo de 15 años.

En general en la zona el consumo de agua, expresado como ETR, ha aumentado de forma leve en las clases pastizales y bosque nativo con valores poco significativos (pocos puntos rojos en relación a la superficie de la clase) y con tendencias cercanas a la neutral con valores positivos y negativos, mientras que las plantaciones forestales presentan un aumento mayor de su consumo hídrico, al presentarse muchos más valores significativos en proporción al área de plantaciones total, con un valor de magnitud S en torno a los +50 mm (Figura 120). Los cultivos por su parte muestran un comportamiento neutral en torno al consumo de agua.

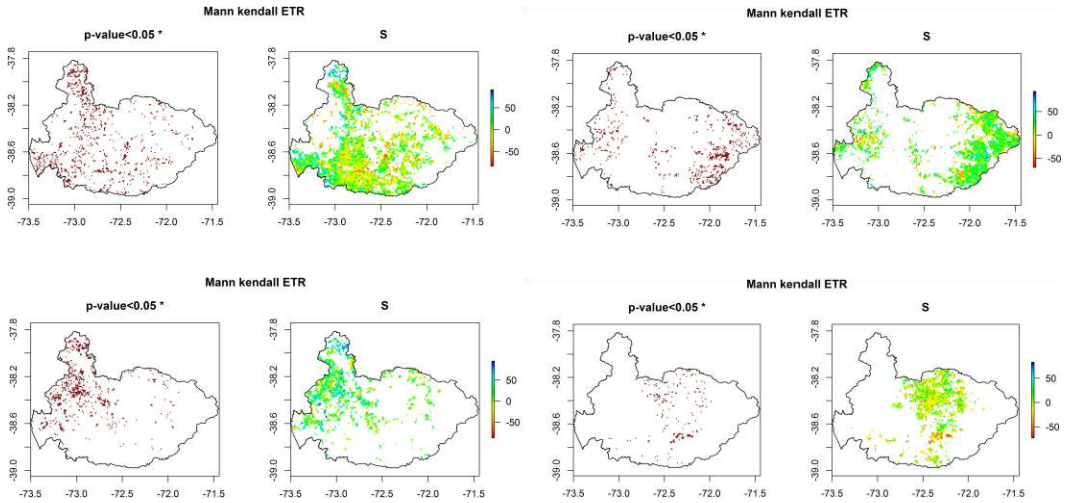


Figura 120. Análisis de tendencias de la ETR por cobertura de suelo ordenados de arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha siguiendo el sentido del reloj (pastizales, bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos). Se presenta la significancia de la tendencia en las figuras de la izquierda donde en rojo se presentan los valores significativos y los mapas en colores representan el valor S de tendencia en mm para el periodo de 15 años.

Resumen

Las coberturas de suelos presentaron un patrón común de disminución de Pp y de aumento de ETP, sin embargo la respuesta en términos de consumo de agua o ETR, fue disímil dentro de la cuenca registrándose una situación de aumento del consumo en bosques nativos y plantaciones forestales los cuales presentan aumentos significativos, mientras que los pastizales registran un patrón neutro de cambios en el consumo de agua. Por su parte la agricultura presenta una situación variable, habiendo una proporción importante de la superficie que registra bajas significativas del consumo dado su condición de secano.

Conclusiones

- Se estableció una robusta metodología espacio temporal para la evaluación de la sequía, la cual puede ser aplicada en otras regiones o escalas de acuerdo a la disponibilidad de datos.
- La mayoría de las cuencas entre las regiones de Atacama y Aysén presentaron tendencias significativas de disminución de la precipitación.
- La mayoría de las cuencas entre las regiones del Maule y Los Ríos, presentaron tendencias significativas de aumento de la demanda atmosférica (ETP).
- El consumo de agua (ETR) por parte de la vegetación silvestre ha disminuido en la zona entre Atacama y la cordillera del Biobío, mientras que desde la región costera del Maule hasta Magallanes se identifica un aumento del consumo por parte de la vegetación lo que podría estar alterando la escorrentía de las cuencas.
- Se identificó una situación de déficit hídrico en prácticamente todas las cuencas entre las regiones de Atacama y la zona norte de Aysén, pero con características disimiles en cuanto a las condiciones climáticas de precipitación y evapotranspiración potencial.
- Las cuencas de los valles transversales en Atacama y Elqui presentaron los niveles más altos de déficit por SPEI de acuerdo a su condición de aridez natural.
- En las cuencas entre Atacama y O'Higgins se identificaron zonas de cultivos bajo riego con aumentos significativos del consumo hídrico caracterizado a través de la evapotranspiración real.
- Las cuencas entre la región del Maule y la zona norte de los Lagos presentaron importantes niveles de déficit, destacándose las cuencas costeras donde se encuentran las plantaciones forestales.
- El análisis por uso de suelo de las cuencas del Maule e Imperial mostraron un estrés hídrico importante en los ecosistemas nativos de bosque nativo y matorral, lo que puede estar afectando su crecimiento y desarrollo. A su vez los sistemas forestales presentaron un significativo aumento del consumo hídrico, sobretodo en la cuenca del Maule sujeta a condiciones más limitantes de pluviometría.

Perspectivas

- Posibilidad de establecer método de monitoreo permanente de Chile y de otras regiones del mundo de forma sistemática.
- Se deben profundizar los análisis a escala de país de las tendencias de las variables de hidrología de superficie para las diferentes coberturas de suelos.
- Se deben establecer otros indicadores hidrológicos importantes dentro del ciclo del agua tales como índices que vinculen la escorrentía, la acumulación de nieves entre otros.
- Se debe utilizar información de consumo por cobertura de suelo para establecer vínculos con las estrategias locales de manejo del recurso hídrico de acuerdo a indicadores de cantidad y calidad del recurso hídrico.
- Se debe establecer en un contexto climático de más largo plazo los resultados obtenidos en este estudio a través de comparaciones con mediciones históricas.
- Posibilidad de usar la base de datos para estudiar otros efectos de cambio global tales como la mortalidad de árboles nativos, la ocurrencia de incendios, o de inundaciones.
- Posibilidad de utilizar esta información para alimentar modelos hidrológicos tanto de optimización del recurso hídrico así como de gestión del agua.
- Información base para establecer escenarios de cambio ya sea por políticas de ordenamiento territorial y/o cambios climáticos.

Referencias

Agnew, C. T., "Using the SPI to Identify Drought" (2000). Drought Network News (1994-2001). Paper 1. http://digitalcommons.unl.edu/droughtnetnews/1.

Boisier, J.P.; Rondanelli, R.; Garreaud, R. and Muñoz, F. (2015). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent mega drought in central Chile. Geophysical Research Letters, 43 (1): 413-421.

Ceccherini, G., Ameztoy, I., Hernández, C., and Moreno, C. (2015). High-Resolution Precipitation Datasets in South America and West Africa based on Satellite-Derived Rainfall, Enhanced Vegetation Index and Digital Elevation Model, Remote Sensing, 7, 6454–6488.

Chapin, III, F. S, Matson, P.A., Vitousek, P.M., (2012). Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology (2nd ed.). Springer, 529 p.

Deblauwe, V., Droissart, V., Bose, R., Sonké, B., Blach-Overgaard, A., Svenning, J. C., Wieringa, J. J., Ramesh, B. R., Stévart, T., and Couvreur, T. L. P. (2016) Remotely sensed temperature and precipitation data improve species distribution modelling in the tropics, Global Ecology and Biogeography.

Falvey, M., and R. D. Garreaud (2009), Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006), J. Geophys. Res., 114, D04102.

Funk, C., ETPerson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., and Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes, Sci Data, 2, 150 066.

Garreaud R., Alvarez-Garreton C., Barichivich J., Boisier J.P., Christie D., Galleguillos M., LeQuesne C., McPhee J., Zambrano-Bigiarini M. (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., doi:10.5194/hess-2017-191

Gupta, Hoshin V., Harald Kling, Koray K. Yilmaz, Guillermo F. Martinez. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, Volume 377, Issues 1-2, Pages 80-91. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003. ISSN 0022-1694.

Guswa AJ, Celia MA, Rodríguez-Iturbe I. (2004). Effect of vertical resolution on predictions of transpiration in water-limited ecosystems, Adv. Water Resour., 27, 467–480.

Mu, Q., M. Zhao, S. W. Running (2011). Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. Remote Sensing of Environment, Volume 115, pages 1781-1800.

Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, (2010) A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. Journal of Climate 23: 1696-1718.

Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., Gracia, C., (2010b): Aridification determines changes in leaf activity in Pinus halepensis forests under semiarid Mediterranean climate conditions. Agricultural and Forest Meteorology 150, 614-628.

Zhao Y., Feng D., Yu L., Wang X., Chen Y.Y., Bai Y., Hernandez H.J., Galleguillos M., Estades C., Biging G.S., Radke J.R., Gong P., (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal data. 183: 170-185. doi:10.1016/j.rse.2016.05.016.