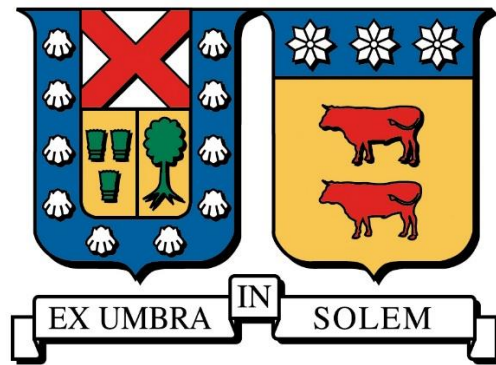


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES



Separación de los efectos del cambio climático y de la actividad antropogénica en la variación de caudal de una cuenca de Chile central

Memoria de Título presentada por

Valentina Fuentes Leiva

Como requisito para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía

Álvaro Ossandón

Octubre de 2023



Contenido

1	Resumen	4
2	Introducción y contextualización.....	5
3	Objetivos.....	6
3.1	Objetivo General	6
3.2	Objetivos Específicos	6
4	Marco Teórico	6
4.1	Hipótesis de Budyko	6
4.1.1	Método de descomposición.....	9
4.2	Evapotranspiración potencial	10
4.2.1	FAO Penman-Monteith:.....	10
4.2.2	Hargreaves:	10
4.2.3	Priesley-Taylor:.....	11
4.2.4	Penman:.....	11
4.3	Evapotranspiración real.....	11
4.4	Métodos de análisis de tendencia	11
4.4.1	Pettitt	12
4.4.2	Mann – Kendall.....	12
4.4.3	Theil Sen	12
5	Zona de estudio y base de datos	12
5.1	Zona de estudio	13
5.1.1	Crisis hídrica	16
5.2	Base de datos.....	16
6	Resultados y análisis.....	19
6.1	Incertidumbre	24
7	Conclusiones.....	28
8	Bibliografía.....	29
9	Anexos	32
9.1	Curva de Buydco – Fu	32
9.1.1	Evapotranspiración FAO Penman – Monteith	32
9.1.2	Evapotranspiración de Hargreaves.....	32
9.1.3	Evapotranspiración de Priestley – Taylor	33
9.1.4	Evapotranspiración de Penman	33



9.2	Curva de Budyko – Turc & Pike	34
9.2.1	Evapotranspiración FAO Penman – Monteith	34
9.2.2	Evapotranspiración de Hargreaves.....	35
9.2.3	Evapotranspiración de Priestley – Taylor	35
9.2.4	Evapotranspiración de Penman	36
9.3	Curva de Budyko – Wang & Tang.....	36
9.3.1	Evapotranspiración FAO Penman – Monteith	36
9.3.2	Evapotranspiración de Hargreaves.....	37
9.3.3	Evapotranspiración de Priestley – Taylor	38
9.3.4	Evapotranspiración de Penman	38
9.4	Curva de Budyko – Zhang	39
9.4.1	Evapotranspiración FAO Penman – Monteith	39
9.4.2	Evapotranspiración de Hargreaves.....	39
9.4.3	Evapotranspiración de Priestley – Taylor	40
9.4.4	Evapotranspiración de Penman	40

Lista de Figuras

Figura 1: Curva de Budyko. (Krajewski et al., 2021)	8
Figura 2: Ubicación subcuenca Rio Petorca en Longotoma	13
Figura 3: Subcuenca Rio Petorca en Longotoma y sus cauces principales.....	14
Figura 4: Caudales mensuales subcuenca Rio Petorca en Longotoma.	14
Figura 5: <i>Precipitación media mensual, subcuenca Rio Petorca en Longotoma.</i>	15
Figura 6: Temperatura histórica mensual, subcuenca Rio Petorca en Longotoma.	15
Figura 7: Ubicación estación fluviométrica Rio Petorca en Peñón.....	17
Figura 8: Ubicación estaciones meteorológicas Rio Petorca en Longotoma, y su división por Polígonos de Thiessen.....	18
Figura 9: Puntos de la grilla en la subcuenca del Rio Petorca en Longotoma	19
Figura 10: Serie de tiempo hidrológica de precipitación (a), temperatura (b), caudal (c), evapotranspiración real (d) y evapotranspiración potencial (e) de la cuenca.	21
Figura 11: (a) Curva de Budyko utilizando la ecuación de Fu y el método de evapotranspiración de la FAO; (b) Acercamiento de los puntos A, B y C de la curva de Budyko.	22
Figura 12: Boxplot de variación de caudal entre periodos 1 y 2 para todas las combinaciones de métodos de evapotranspiración y curvas de Budyko.....	25
Figura 13: Boxplot considerando: (a) un método de evapotranspiración fijo y sus respectivos valores obtenidos por los 4 métodos de Budyko, y (b) un método de Budyko fijo y sus respectivos valores obtenidos por los 4 métodos de evapotranspiración potencial.....	27



1 Resumen

Dada la actual emergencia climática que se vive a nivel mundial, se quiere conocer el impacto que tienen el cambio climático y la acción antropogénica en la variación de la esorrentía de una cuenca. Es por esto que este estudio tiene como propósito determinar los porcentajes en que contribuyen el cambio climático global y la actividad humana local en la variación del caudal de una cuenca de Chile Central.

Para realizar esto, se aplica el método de descomposición de la hipótesis de Budyko en la subcuenca Río Petorca en Longotoma, en la región de Valparaíso, considerando una serie de tiempo entre los años 1980 y 2017. Este sector corresponde a una zona que se ha visto muy afectada e intervenida en los últimos años por el ser humano, especialmente por la agricultura, que es uno de los pilares de la economía local.

En primer lugar, se determina el punto de cambio en la tendencia de la serie de caudal mediante el test de Pettitt, el que revela que este cambio ocurrió en el año 2006, a partir del cual se divide el periodo en uno antes y otro después del cambio.

A continuación, se aplican las ecuaciones de Budyko, con lo que se encuentra que el mayor contribuyente a la disminución del caudal de la cuenca es el cambio climático. En este caso, el aporte relativo del cambio climático es de un 60,2%, mientras que el de las actividades humanas es de 39,8%. Además, se obtiene que la variación del caudal entre el periodo 1 y el periodo 2 es de $-76,79 [mm]$.

Además, las curvas de Budyko fueron generadas a partir de cuatro diferentes métodos de evapotranspiración, con lo que se busca analizar la incertidumbre producto de utilizar cada una de ellas. De esto último, se obtiene que el método que presenta mayor incertidumbre corresponde al de Penman, mientras que el método con menor incertidumbre es el de Hargreaves, por lo que se recomienda su uso en futuras investigaciones.



2 Introducción y contextualización

En el ciclo hidrológico, el agua se mueve a través de procesos tales como evaporación, condensación, precipitación, escorrentía, infiltración, entre otros. En las últimas décadas, la distribución de los recursos hídricos se ha visto afectada en diferentes partes del mundo (Lipczynska-Kochany, 2018), producto de dos importantes contribuyentes: el cambio climático global y los efectos antropogénicos locales (Dey & Mishra, 2017). En el caso de la variación de precipitación y/o temperatura, estas están asociada a efectos producidos por el cambio climático, mientras que la variación que se observa en la evapotranspiración representa los efectos antropogénicos, ya sean asentamientos humanos, regulaciones de caudal, cambios de vegetación que impacten en el caudal, entre otros. (Sharma & Mondal, 2022).

Debido a lo mencionado, es de real importancia identificar y diferenciar los impactos de los contribuyentes mencionados para así formular escenarios de adaptación medioambiental y minimizar los efectos negativos que se produzcan en el futuro. Las ecuaciones de Budyko (Budyko, 1974) han sido ampliamente utilizadas para separar las contribuciones del cambio climático y los efectos antropogénicos en la variación de escorrentía en periodos a largo plazo (Jiang et al., 2015). Para esto, se requiere de la información hidrológica histórica anual de precipitación y temperatura de una cuenca a analizar, además del caudal de salida y la evapotranspiración real y potencial de ella. Este método ha sido utilizado, por ejemplo, en las cuencas de los ríos Weihe (Jiang et al., 2015) y Tao (Guan et al., 2021) en China, y en la cuenca Gordon Gulch en Estados Unidos (Hale et al., 2021), pero no hay registro de que se haya aplicado en alguna cuenca en Chile.

Entonces, en el presente estudio se implementará el método basado en las ecuaciones de Budyko en una subcuenca de la Cuenca Río Petorca, en la Región Valparaíso. En este caso, la evapotranspiración potencial (ETP) se obtendrá de manera indirecta, aplicando ecuaciones que permitan su obtención mediante otras mediciones tales como temperatura, velocidad del viento o presión de la zona. Se utilizarán los métodos de Penman-Monteith (FAO), de Hargreaves, de Priestley-Taylor y de Penman para su estimación, de manera tal que se pueda evaluar la incertidumbre asociada a utilizar distintos métodos para la estimación de la ETP. Además, se obtendrá la evapotranspiración real utilizando la ecuación general del balance hidrológico. Una vez obtenida toda la información requerida, se analizará la estadística de la cuenca y se encontrará el punto de cambio en la serie de tiempo de caudal, distinguiendo así un periodo pre-cambio y uno post-cambio para formar la curva de Budyko. De esta manera, se podrá cuantificar la contribución del cambio climático y de la actividad humana en la cuenca en estudio.



3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Implementar el Método de Budyko para diferenciar las componentes de cambio climático global y de actividad antropogénica local asociadas a la variación de caudal de una cuenca de la zona central de Chile.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar la estadística hidrológica de la cuenca en estudio para encontrar el año en que ocurre el cambio en el régimen de caudal, para diferenciar entre periodo pre- y post-cambio.
- Calcular la evapotranspiración potencial a partir de distintos métodos, utilizando como inputs datos de temperatura de CR2MET, velocidad del viento del Explorador Eólico y la elevación de la cuenca.
- Comparar las curvas de Budyko obtenidas debido a la utilización de diferentes métodos de estimación de evapotranspiración y evaluar su incertidumbre asociada.

4 Marco Teórico

La evapotranspiración resume la interacción entre la disponibilidad hídrica y la disponibilidad energética, y surge como uno de los componentes vitales del ciclo hidrológico que entrega información sobre la dinámica entre el clima, el suelo y la vegetación (Dey & Mishra, 2017)

El balance hídrico es una herramienta de modelación que tiene como base el ciclo hidrológico para el cálculo de la oferta hídrica. En el balance para largos periodos de tiempo el almacenamiento de aguas subterráneas y superficiales puede despreciarse ($\Delta S = 0$), por lo que se puede considerar como:

$$P = ET + Q \quad (1)$$

Donde,

P : precipitación, mm .

ET : evapotranspiración real, mm .

Q : escurrimiento, mm .

4.1 Hipótesis de Budyko

La hipótesis de Budyko describe el balance hídrico a largo plazo a través de una relación entre la evapotranspiración real, la evapotranspiración potencial y la precipitación de la cuenca, demostrando que la razón entre la evapotranspiración real y la precipitación es función de la razón entre la evapotranspiración potencial y la precipitación, y de las propiedades de la cuenca (Sharma & Mondal, 2022).

$$\frac{ET}{P} = f\left(\frac{ETP}{P}, m\right) \quad (2)$$



Donde,

$\frac{ET}{P}$: razón de evaporación.

$\frac{ETP}{P}$: índice de aridez.

m : parámetro que representa las propiedades de la cuenca.

Esta relación es representada en diferentes ecuaciones planteadas por distintos autores, presentándose algunos en la siguiente tabla:

Tabla 1: Cuatro ecuaciones tipo Budyko consideradas en este estudio

Autor	Expresión
Fu (1981)	$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{ETP}{P} - \left[1 + \left(\frac{ETP}{P} \right)^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3)$
Zhang et al (2001)	$\frac{ET}{P} = \frac{1 + \frac{ETP}{P} m}{1 + \frac{ETP}{P} m + \frac{P}{ETP}} \quad (4)$
Turc (1953) y Pike (1964)	$\frac{ET}{P} = \left(1 + \left(\frac{ETP}{P} \right)^m \right)^{-\frac{1}{m}} \quad (5)$
Wang y Tang (2014)	$\frac{ET}{P} = \frac{1 + \frac{ETP}{P} - \sqrt{1 + \left(\frac{ETP}{P} \right)^2 - 4m(2-m) \left(\frac{ETP}{P} \right)}}{2m(2-m)} \quad (6)$

A partir de estas relaciones se puede construir la curva de Budyko, la cual se presenta a continuación.

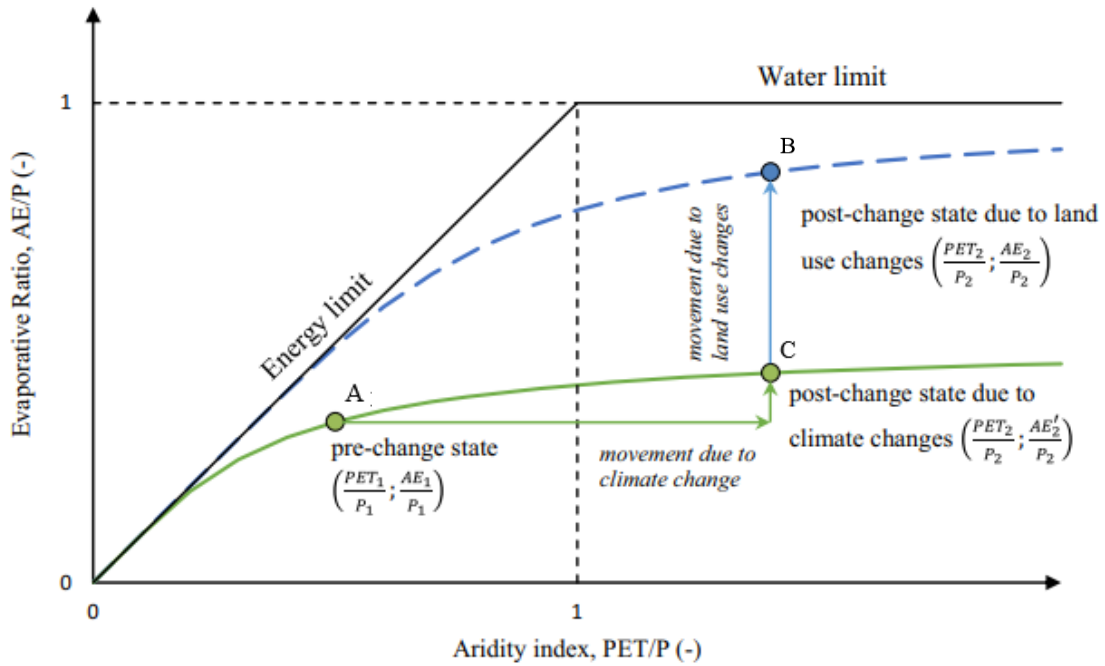


Figura 1: Curva de Budyko. (Krajewski et al., 2021)

Es posible notar en la Figura 1 que existen 2 límites para la evapotranspiración: el límite de energía, que ocurre cuando $\frac{ET}{P} = \frac{ETP}{P}$, y significa que la precipitación es mayor a la evapotranspiración; y el límite de agua, que ocurre cuando $\frac{ET}{P} = 1$, y quiere decir que la evapotranspiración es mayor que la precipitación.

Se considera que el cambio en la escorrentía que resulta por variaciones en la precipitación y/o temperatura se le atribuye a los efectos del cambio climático, mientras que la variación de caudal debida a actividades humanas en la zona se relaciona con variaciones en la evapotranspiración real (Sharma & Mondal, 2022).

Para separar los impactos del cambio climático y los de la acción antropogénica local, lo primero que se debe hacer es encontrar un punto de cambio en el caudal de la serie de tiempo considerada utilizando el test no paramétrico de Pettitt (Pettitt, 1979). Éste identifica cambios significativos en el caudal de la cuenca durante el tiempo estudiado (Ma et al., 2008; Sharma & Mondal, 2022; Zhang et al., 2008), considerando un nivel de significancia de 0.05, de manera de poder separar la serie de tiempo en 2: antes del cambio, o periodo 1, y después del cambio, o periodo 2.

Ahora, considerando estos dos periodos, es posible ajustar el parámetro de la cuenca (m) para cada uno, obteniendo así m_1 y m_2 para los periodos 1 y 2, respectivamente. Con esto es posible graficar la curva para ambos, lo que es representado en la Figura 1 como las curvas color verde (periodo 1) y azul (periodo 2).



4.1.1 Método de descomposición

Wang y Hejazi (2011) propusieron el **método de descomposición**, que establece que se puede determinar la principal razón del cambio en la cantidad de caudal observando la posición en que se encuentra la cuenca con respecto a la curva de Budyko. Este método plantea que, si el cambio en el caudal es producto únicamente del cambio climático, la cuenca se desplazará horizontalmente siguiendo la curva del primer periodo, ya sea a zonas más húmedas o más secas, mientras que, si la variación es debida, además, a efectos de la acción humana, la cuenca se alejará verticalmente de la curva de Budyko inicial.

La posición de la cuenca se encuentra a partir de los valores medios del par índice de aridez – índice de evaporación para ambos periodos, los cuales son graficados en las respectivas curvas de Budyko. En la Figura 1 se encuentran representadas las posiciones de la cuenca antes y después del cambio, siendo estos los puntos A y B, respectivamente. Además, se encuentra graficado un tercer punto, el punto C, el cual es hipotético, y representa el punto en que se ubicaría la cuenca en el segundo periodo si la variación en la escorrentía se debiera solo a cambio climático. Este punto presenta el valor del índice de aridez del periodo 2, pero se ubica en la curva ajustada para el primer periodo. A continuación, se presentan las posiciones de los puntos mencionados dentro de los gráficos.

$$A = \left(\left(\frac{ETP}{P} \right)_1, \left(\frac{ET}{P} \right)_1 \right) \quad B = \left(\left(\frac{ETP}{P} \right)_2, \left(\frac{ET}{P} \right)_2 \right) \quad C = \left(\left(\frac{ETP}{P} \right)_2, \left(\frac{ET}{P} \right)_2' \right)$$

Donde,

$\left(\frac{ETP}{P} \right)_1$: valor medio del índice de aridez del periodo antes del cambio.

$\left(\frac{ETP}{P} \right)_2$: valor medio del índice de aridez del periodo después del cambio.

$\left(\frac{ET}{P} \right)_1$: índice de evaporación respectivo del valor medio de índice de aridez del periodo 1, en la curva ajustada para el periodo 1.

$\left(\frac{ET}{P} \right)_2$: índice de evaporación respectivo del valor medio de índice de aridez del periodo 2, en la curva ajustada para el periodo 2.

$\left(\frac{ET}{P} \right)_2'$: índice de evaporación respectivo del valor medio de índice de aridez del periodo 2, en la curva ajustada para el periodo 1.

Luego, la diferencia de caudal entre ambos periodos, es decir, ΔQ , se puede separar en ΔQ_c y en ΔQ_h , como se muestra continuación.

$$\Delta Q = \Delta Q_c + \Delta Q_h \quad (7)$$



Donde,

ΔQ_c : variación de caudal debido al cambio climático.

ΔQ_h : variación de caudal debido al efecto antropogénico.

Cada una de las contribuciones se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

El cambio de caudal producto del cambio climático, es decir, variación desde el punto A hacia el punto C, se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$\Delta Q_c = P_2 \left(1 - \left(\frac{ET}{P} \right)_2' \right) - Q_1 \quad (8)$$

Luego, el cambio de caudal debido a la acción humana, es decir, desde el punto C hacia el punto B, se calcula como se presenta a continuación.

$$\Delta Q_h = P_2 \left(\left(\frac{ET}{P} \right)_2' - \left(\frac{ET}{P} \right)_2 \right) \quad (9)$$

Donde,

P_2 : precipitación promedio del periodo 2.

Q_1 : caudal promedio del periodo 1.

4.2 Evapotranspiración potencial

Entonces, como se plantea anteriormente, es necesario calcular la evapotranspiración potencial de la cuenca para poder utilizar los métodos presentados. Las ecuaciones que se utilizarán son las siguientes:

4.2.1 FAO Penman-Monteith:

$$ETP = \frac{0.408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (10)$$

Donde,

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor, $kPa/^\circ C$.

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo, $MJ/m^2 día$.

G : flujo del calor del suelo, $MJ/m^2 día$.

γ : constante psicrométrica, $kPa/^\circ C$.

T : temperatura media del aire, $^\circ C$.

u_2 : velocidad del viento a 2m de altura, m/s .

e_s : presión de vapor de saturación, kPa .

e_a : presión real de vapor, kPa .

4.2.2 Hargreaves:

$$ETP = 0.0023 \cdot (T_{med} + 17.8) \cdot \sqrt{T_{max} - T_{min}} \cdot R_a \quad (11)$$

Donde,

T_{med} : Temperatura media del día, $^\circ C$.

T_{max} : Temperatura máxima del día, $^\circ C$.



T_{min} : Temperatura mínima del día, °C.

R_a : radiación extraterrestre, $mm/día$.

4.2.3 Priesley-Taylor:

$$ETP = 1.26 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (12)$$

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor, $kPa/°C$.

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo, $MJ/m^2 día$.

G : flujo del calor del suelo, $MJ/m^2 día$.

4.2.4 Penman:

$$ETP = 0.017 \cdot RN \cdot W + (1 - W) \cdot 0.265 \cdot (1 + 0.0062 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a) \quad (13)$$

Donde,

RN : radiación neta, $cal/cm^2 día$.

u_2 : velocidad del viento a 2m de altura, $km/día$.

e_s : presión de vapor de saturación, *milibar*.

e_a : presión real del vapor, *milibar*.

W : factor de ponderación:

$$W = 0.414 + 0.0125 \cdot T$$

4.3 Evapotranspiración real

En cuanto a la evapotranspiración real, esta se obtiene de la siguiente manera:

$$ET = P - Q \quad (14)$$

Donde,

P : precipitación media de la cuenca, *mm*.

Q : caudal medio de salida de la cuenca, *mm*.

4.4 Métodos de análisis de tendencia

Se realiza, además, un análisis de la tendencia de cada una de las variables climatológicas mediante pruebas de hipótesis. A partir de ellas es posible conocer si es que existe o no una tendencia significativa, y también su magnitud.

En estas pruebas se comparan dos hipótesis: hipótesis nula e hipótesis alternativa. La primera plantea una afirmación con respecto a la población que sirve para refutar la hipótesis de investigación, mientras que la segunda, generalmente, corresponde a negar la afirmación de la hipótesis nula (Rivas- Tovar, 2015). Se utiliza en estos casos un nivel de significancia, α , el cual corresponde al límite de la zona de rechazo de la hipótesis nula. Por otra parte, p-value corresponde a la probabilidad de que un resultado haya ocurrido por casualidad. Si p-value es menor al nivel de significancia, el resultado es estadísticamente significativo, con lo que se rechaza la hipótesis nula (Mueses, 2008), lo que quiere decir que existe evidencia suficiente para aceptar la hipótesis de investigación.



En este estudio, se aplican 3 pruebas no paramétricas: Pettitt, Mann – Kendall y Theil Sen.

4.4.1 Pettitt

Tal como se menciona antes, se utiliza el test de Pettitt (Pettitt, 1979) para encontrar el año de cambio en la tendencia en la serie anual de caudal histórico.

La hipótesis nula plantea que los datos siguen una distribución sin presentar un cambio abrupto, en cambio la hipótesis alternativa expresa que existe un punto de cambio en la serie. Si el p-value entregado es menor al nivel de significancia, significa que sí existe un cambio notorio en la serie de tiempo.

4.4.2 Mann – Kendall

La prueba de Mann – Kendall (Mann, 1954; Kendall, 1975) se utiliza para detectar la existencia de una tendencia, o falta de ella, de una serie de tiempo de alguna variable. En ella se comparan, secuencialmente, los valores de una serie y se analiza el signo de la diferencia entre ellos (Alencar da Silva Alves & Silva Nóbrega, 2017).

La hipótesis nula de esta prueba corresponde a que no existe una tendencia monótona en la serie, mientras que la hipótesis alternativa plantea que sí existe una tendencia, ya sea positiva o negativa. El análisis de esta prueba entrega finalmente un valor Z. Si el p-value obtenido es menor al nivel de significancia escogido, entonces sí existe una tendencia en la serie, y, en tal caso, si Z es positivo, significa que la serie se presenta una tendencia creciente, mientras que valores negativos de Z representan una tendencia decreciente en el tiempo.

4.4.3 Theil Sen

La pendiente de Theil Sen (Theil, 1950; Sen, 1968) corresponde a una regresión no paramétrica que busca encontrar la pendiente de una serie de tiempo. En esta regresión se calcula, en primer lugar, la pendiente de todos los pares de datos ordenados por tiempo, y, a continuación, los valores de pendiente calculados se ordenan de menor a mayor. Luego, la mediana de las pendientes corresponde a la pendiente de la serie (Gocic & Trajkovic, 2013).

5 Zona de estudio y base de datos

Para poder lograr el objetivo de separar los efectos del cambio climático y los efectos antropogénicos en el caudal de la cuenca seleccionada, es necesario formular la curva de Budyko, para lo que se debe obtener la información meteorológica y pluviométrica de la cuenca, y así ser capaz de medir las evapotranspiraciones potencial y real.

Como se puede observar en las ecuaciones (10), (11), (12) y (13), para la evapotranspiración potencial se requieren variables como la temperatura media, máxima y mínima, la elevación y la velocidad del viento. La temperatura será obtenida mediante los datos grillados del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2), la elevación es proporcionada por CGIAR CSI Geoportal, mientras que la velocidad del viento se obtiene del Explorador de Energía Eólica del Ministerio de Energía.

Por otra parte, a partir de la ecuación (14) se observa que para la evapotranspiración real se necesitan los datos de precipitación y de caudal de salida de la cuenca. Esta información se obtiene a partir de la estadística hidrológica en línea de la DGA.

Una vez obtenidas las evapotranspiraciones, es posible aplicar las ecuaciones de Budyko, presentadas en la Tabla 1.

5.1 Zona de estudio

La cuenca estudiada corresponde a una subcuenca ubicada en la parte baja de la cuenca Río Petorca, en el sector norte de la Región de Valparaíso, en la zona central de Chile. La subcuenca se ubica entre las comunas de La Ligua y Petorca, y se extiende entre los paralelos $32^{\circ}03'$ – $32^{\circ}25'$ latitud sur, y meridianos $71^{\circ}22'$ – $70^{\circ}59'$ longitud oeste, y cuenta con la presencia principalmente del Río Petorca entre Estero Las Palmas y Desembocadura y del tributario Estero Las Palmas.

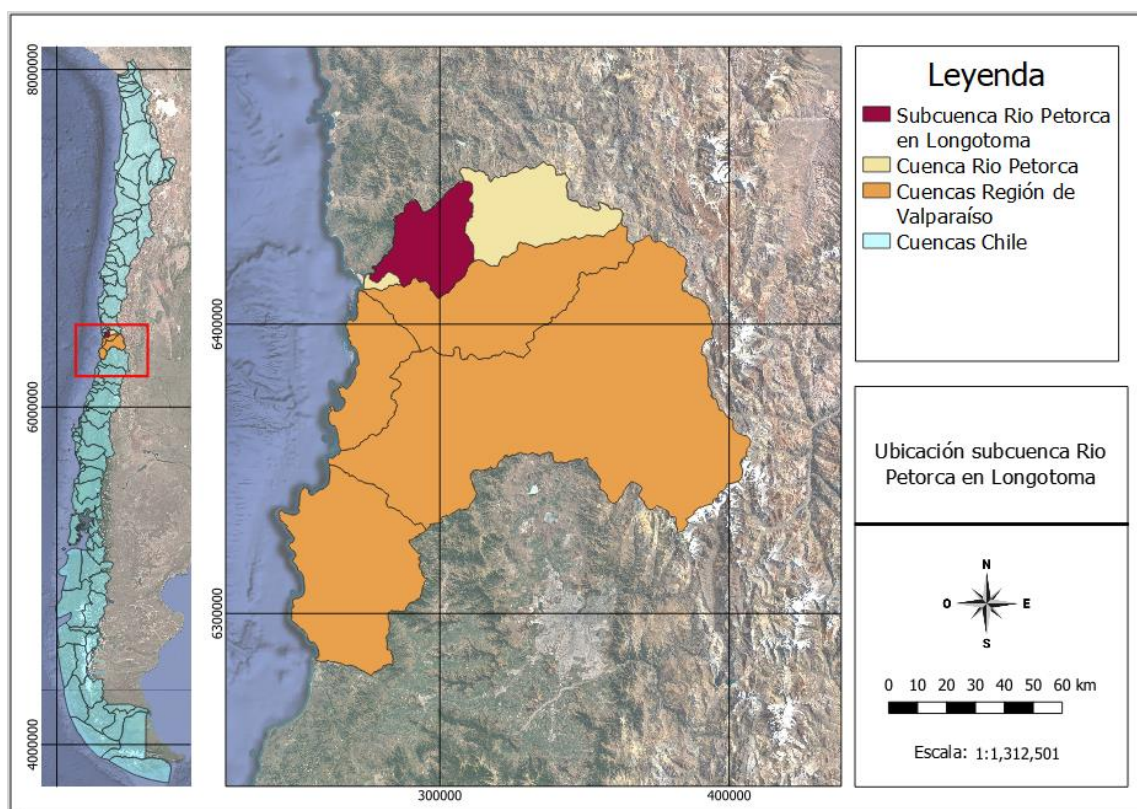


Figura 2: Ubicación subcuenca Río Petorca en Longotoma

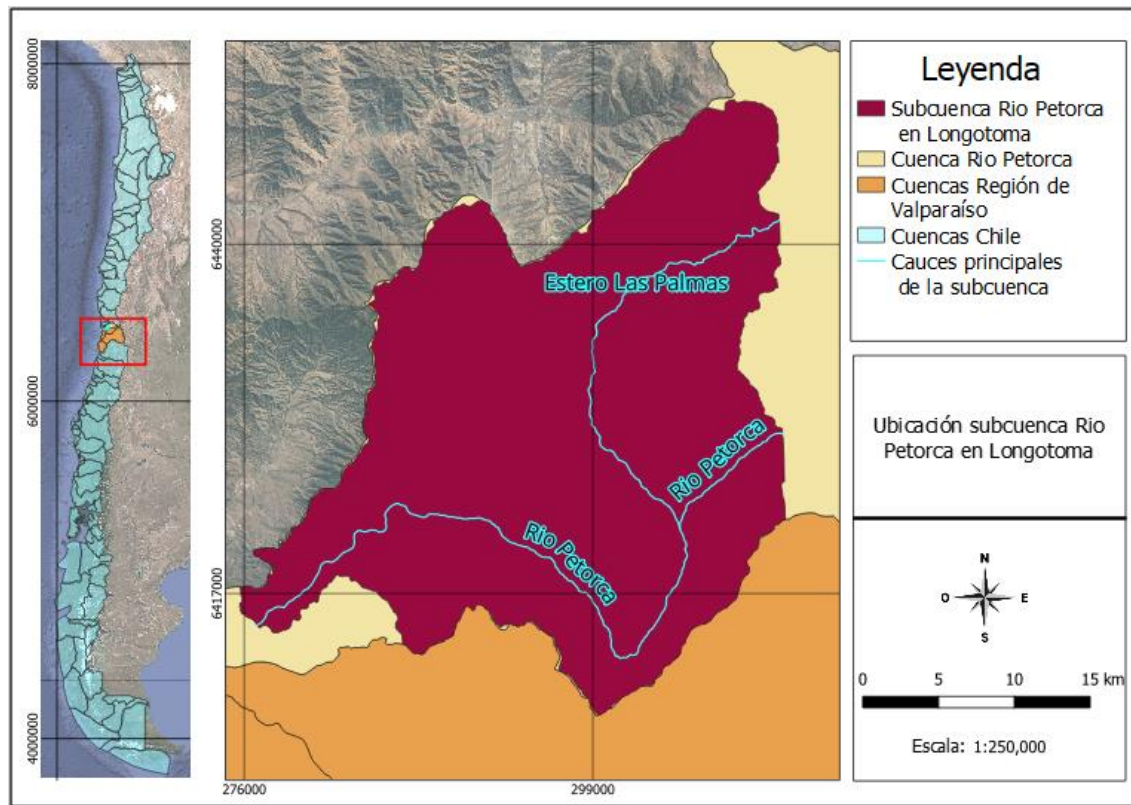


Figura 3: Subcuenca Río Petorca en Longotoma y sus cauces principales.

La subcuenca cuenta con un área de 816 km^2 . Presenta mayoritariamente un clima semiárido templado, de escasa humedad atmosférica, con lluvias invernales, según la clasificación de Köppen (CIREN, 2016). En la subcuenca estudiada, el principal curso de agua corresponde a la parte baja del Río Petorca, el cual tiene una extensión de 55 km dentro de la subcuenca, aproximadamente, y desemboca en el mar en la bahía de La Ligua. Además, la subcuenca presenta un desnivel máximo de 2.315 m , presentando una altura máxima de 2.326 m y una altura mínima de 11 m .

El río presenta un régimen nivo-pluvial debido a que el Río Petorca nace en la precordillera de Los Andes, teniendo tres máximos de caudal mensual: el mayor en el mes de agosto y otros dos en los meses de junio y octubre, tal como se puede observar en la Figura 4.

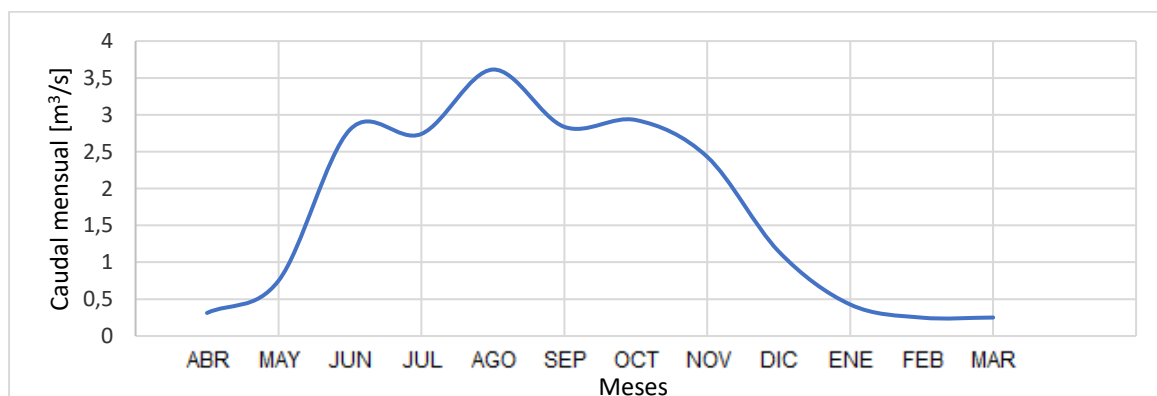


Figura 4: Caudales mensuales subcuenca Río Petorca en Longotoma.

En cuanto a las precipitaciones anuales, éstas presentan una variabilidad que oscila entre 160 y 300 mm. Por otra parte, la distribución mensual de estas precipitaciones se concentra principalmente en los meses de julio y agosto, tal como se evidencia en la Figura 5.

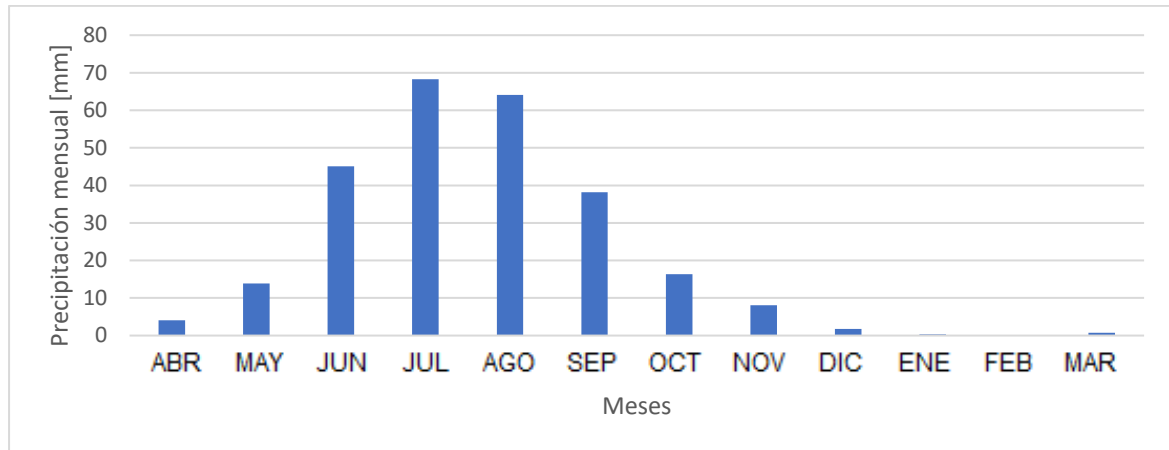


Figura 5: Precipitación media mensual, subcuenca Rio Petorca en Longotoma.

Con respecto a la temperatura media, ésta en promedio anualmente es de 7,5°C. En la siguiente figura se presentan las temperaturas media, máxima y mínima a nivel mensual a partir de registros histórico, en la que se observa que los meses más calurosos son los meses de enero y febrero (verano), y los más fríos corresponden a julio y agosto (invierno).

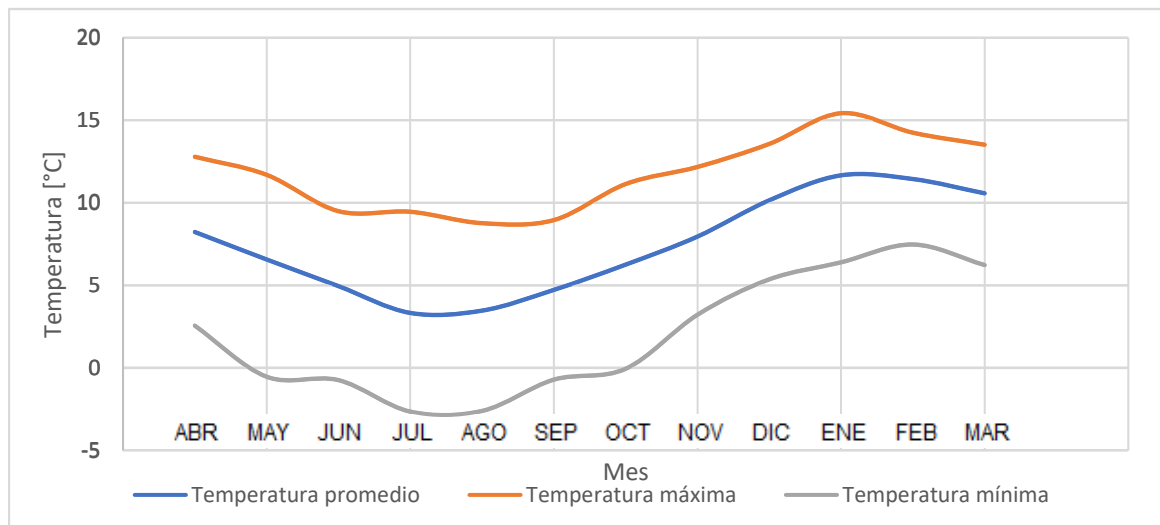


Figura 6: Temperatura histórica mensual, subcuenca Rio Petorca en Longotoma.

Entonces, a partir de lo observado en las Figura 4, Figura 5 y Figura 6 se respalda el régimen nivopluvial de la cuenca, debido que se presenta un peak de caudal en el mes de octubre producto del deshielo dado que comienza a aumentar la temperatura, además del peak de caudal en el mes de julio y agosto producto de las precipitaciones de invierno.

Por otra parte, se puede mencionar que la agricultura es la principal actividad económica de la zona, ocupando el 24% de los empleos. También está presente la minería en explotaciones de concentrado de Cobre y Oro, y de recursos no metálicos.



Durante las últimas décadas se ha desarrollado un avance en la producción de frutales, donde los paltos y limones son los de mayor importancia, ocupando gran parte de la cantidad de agua disponible.

Los suelos de la comuna de Petorca corresponden a una zona de transición entre suelos de serranías áridas y semáridas, suelos graníticos de la costa y el comienzo de los suelos aluviales del valle central. Sus características radican en la presencia de materiales sedimentarios medios a gruesos, suelos superficiales e inestables y la falta de agua (CIREN, 2016)

5.1.1 Crisis hídrica

Es importante mencionar que la zona en estudio se encuentra en una crisis hídrica y ambiental desde hace años. En Chile central existe una escasez hídrica caracterizada por una mega-sequía que ha afectado la región desde el año 2010, atribuyendo aproximadamente un 25% de esta condición al cambio climático antropogénico (Muñoz et al., 2020). Parte de esta escasez de agua puede ser atribuida al intenso y creciente uso en el área agrícola, que tal como se menciona anteriormente, es una de las principales actividades del sector. Además, a partir del año 2006 las precipitaciones en la zona no han alcanzado las de un año normal, lo que afecta los caudales disponibles para el consumo humano y el uso agrícola (Moraga, 2018).

La cuenca fue declarada área de restricción en el año 1997, lo que significa que solo se pueden otorgar derechos de aprovechamiento de agua con carácter provisional. A pesar de esto, recién en el año 2008 se comenzó a controlar el uso de agua en la cuenca, por lo que la falta de fiscalización empeoró la situación en la que se encuentra la cuenca, y es por esto que en julio del 2018 fue declarada zona de prohibición (DGA, 2018; CR2, 2021). Lo último quiere decir que no es posible otorgar nuevos derechos de aprovechamiento, ya que la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida.

Durante el periodo entre 2008 y 2018, se registraron 241 denuncias formales por el uso ilegal de las aguas de la cuenca (CR2, 2021), lo que evidencia el mal manejo y la baja fiscalización del uso del recurso. Por otra parte, en el año 2018 se censaron 4.803 hectáreas de paltos dentro de la cuenca, según el informe de la Fundación Terram “*Erosión de Suelos y Crisis Hídrica*” (Miranda, 2018), mientras que en el año 2019 más de 383.000 hogares rurales vivían sin suministro de agua potable, con un 15,4% de sus comunidades recibiendo agua por medio de camiones aljibe (Fundación Amulén et al., 2019). Esto evidencia la desigualdad producto de la escasez de agua, la cual es perpetuada por las medidas de mitigación consideradas, las que, además de ser precarias, no aportan soluciones a largo plazo.

5.2 Base de datos

Se descarga entonces la base de datos de la cuenca Rio Petorca, que presenta series de tiempo con 37 años de datos concurrentes de precipitación, temperatura y caudal, entre los años 1980 y 2017.

La cuenca fue delimitada a partir de la estación fluviométrica **Rio Petorca en Longotoma**, ubicada en la latitud $S\ 32^{\circ}\ 22'$ y longitud $W\ 71^{\circ}\ 22'$, estación en la cual se obtienen los valores de caudal de salida de la cuenca. Sin embargo, esta estación presenta aproximadamente 8 años de datos perdidos a lo largo de la serie de tiempo, por lo que se realiza una transposición de caudales medios utilizando la estación fluviométrica **Rio Petorca en Peñón**, la cual se ubica en la latitud $S\ 32^{\circ}\ 16'$ y longitud $W\ 70^{\circ}\ 59'$. Cabe mencionar que ambas estaciones se ubican en el cauce del Rio Petorca, por lo que presentan el mismo régimen. Las estaciones se presentan en la siguiente figura y en la Tabla 2 se muestra su información.

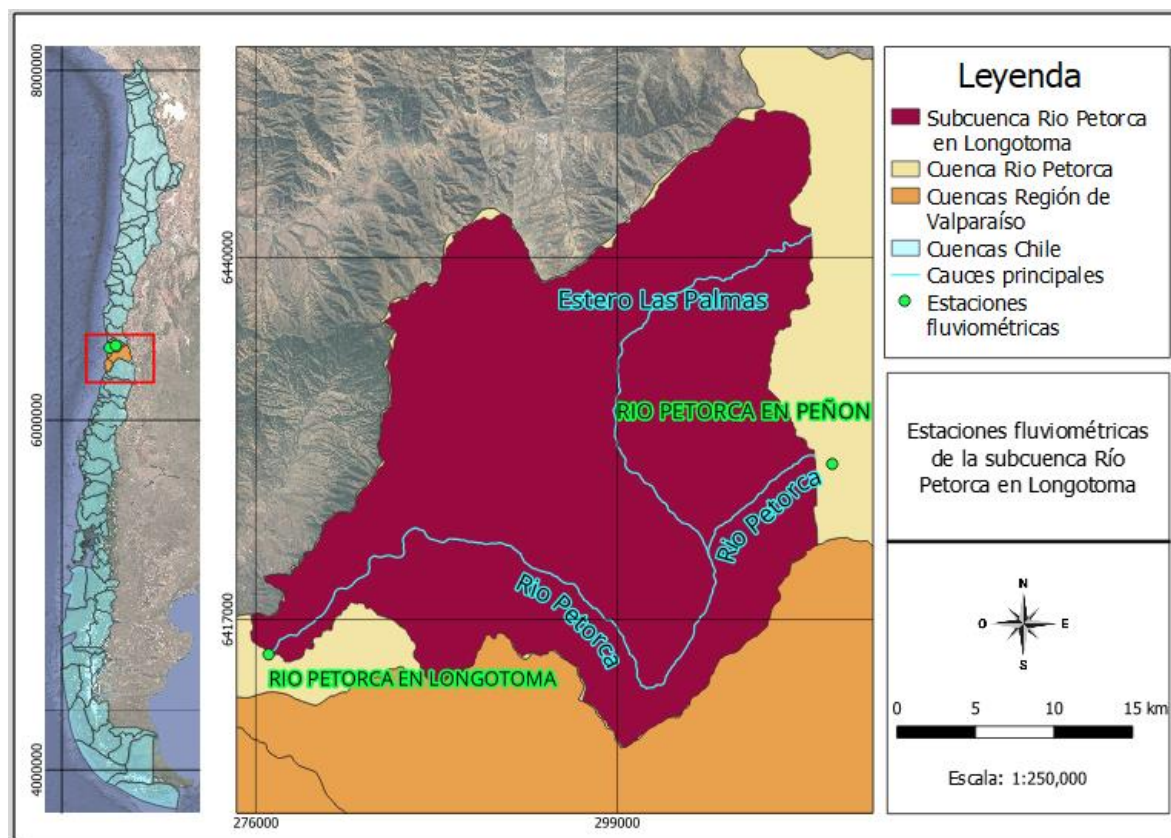


Figura 7: Ubicación estación fluviométrica Río Petorca en Peñón.

Tabla 2: Resumen información estaciones fluviométricas utilizadas en el estudio.

Nombre	Código Estación	Institución	Altura (msnm)	Este WGS 84/UTM 19S	Norte WGS 84/UTM 19S
Río Petorca en Longotoma	05120001-2	DGA	126	276.786	6.414.832
Río Petorca en Peñón	05110002-6	DGA	450	312.690	6.426.939

Por otra parte, la precipitación fue obtenida a partir de 6 estaciones meteorológicas: **Artificio, El Salvador, Frutillar Alto, Las Colmenas, Longotoma y Palquico**. A partir de ellas es posible encontrar el área de influencia de cada una al aplicar el método de Polígonos de Thiessen, de manera de poder obtener un valor de precipitación media para toda la cuenca. Cabe mencionar que las estaciones presentaron un porcentaje de datos faltantes entre 1 y 3%, por lo que se considera que la cantidad de datos existentes es válida para realizar el estudio. La ubicación de cada una de las estaciones se presenta en la Figura 8, mientras que en la Tabla 3 se presenta su información. Además, en la Tabla 4 se presenta el área de influencia de cada estación.

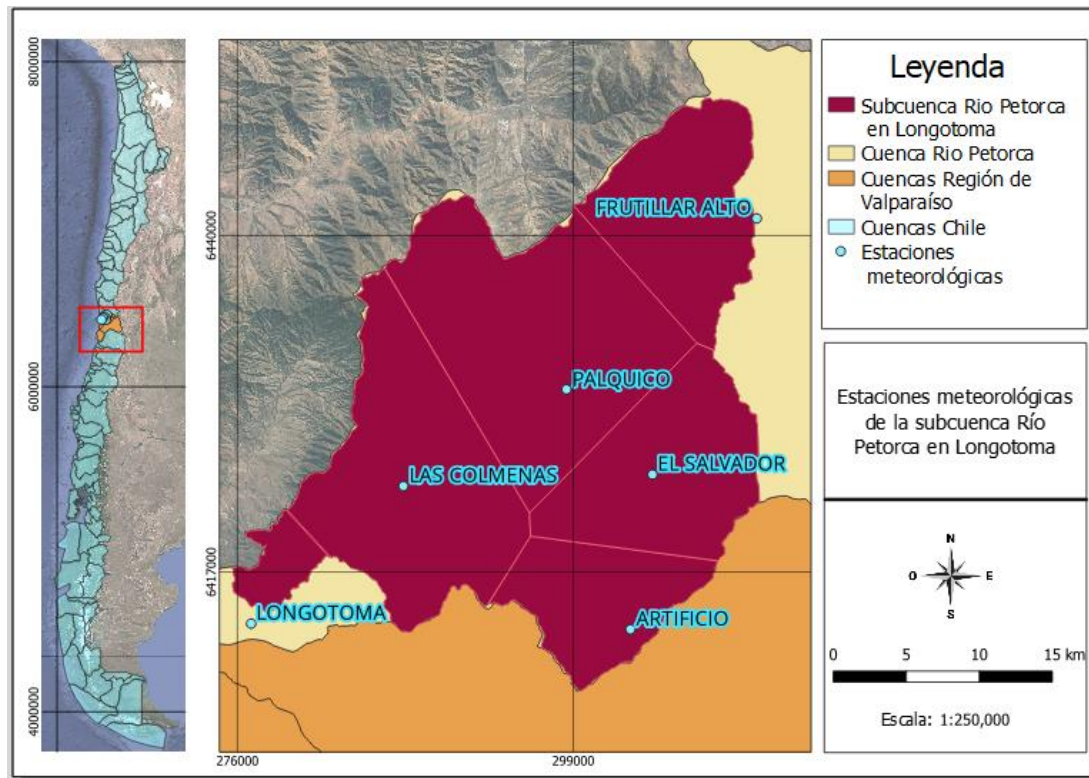


Figura 8: Ubicación estaciones meteorológicas Río Petorca en Longotoma, y su división por Polígonos de Thiessen.

Tabla 3: Resumen información estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Nombre	Código Estación	Institución	Altura (msnm)	Este WGS 84/UTM 19S	Norte WGS 84/UTM 19S
Artificio	05120003-9	DGA	250	302.911	6.413.118
El Salvador	05111004-8	DGA	340	304.423	6.423.722
Frutillar Alto	05111002-1	DGA	780	311.571	6.441.237
Las Colmenas	05120004-7	DGA	80	287.352	6.422.921
Longotoma	05120006-3	DGA	20	276.914	6.413.513
Palquico	05111001-3	DGA	450	298.531	6.429.544

Tabla 4: Área de cada estación entregada por Polígonos de Thiessen

Nombre	Artificio	El Salvador	Frutillar	Las Colmenas	Longotoma	Palquico
Área [km^2]	87,52	139,02	123,45	20,38	23,53	238,75

Con esto, es posible obtener la evapotranspiración real de la cuenca siguiendo la ecuación (14) presentada en el Marco Teórico.

En cuanto a la evapotranspiración potencial, tal como se menciona antes, es necesario tener los datos de temperatura del CR2, el cual entrega información diaria con una resolución espacial de $5 \times 5 \text{ km}^2$, desde el año 1979 hasta el año 2020, mientras que la información del viento es entregada por el Explorador Eólico con una resolución espacial de $1 \times 1 \text{ km}^2$, a nivel horario, desde el año 1980 hasta el año 2017. Además, para obtener los valores de elevación de cada punto de la grilla se utiliza un Modelo de Elevación Digital (DEM), el cual presenta una resolución espacial de $90 \times 90 \text{ m}^2$.

Entonces, en total se cuenta con 64 puntos de grilla, los que corresponden al centro de los pixeles entregados por los datos de temperatura del CR2, el cual posee la resolución más grande entre las variables mencionadas anteriormente, y se presentan en la Figura 9. Estos puntos se ubican entre las latitudes -32.430 y -32.060 , y entre las longitudes -71.375 y -70.992 .

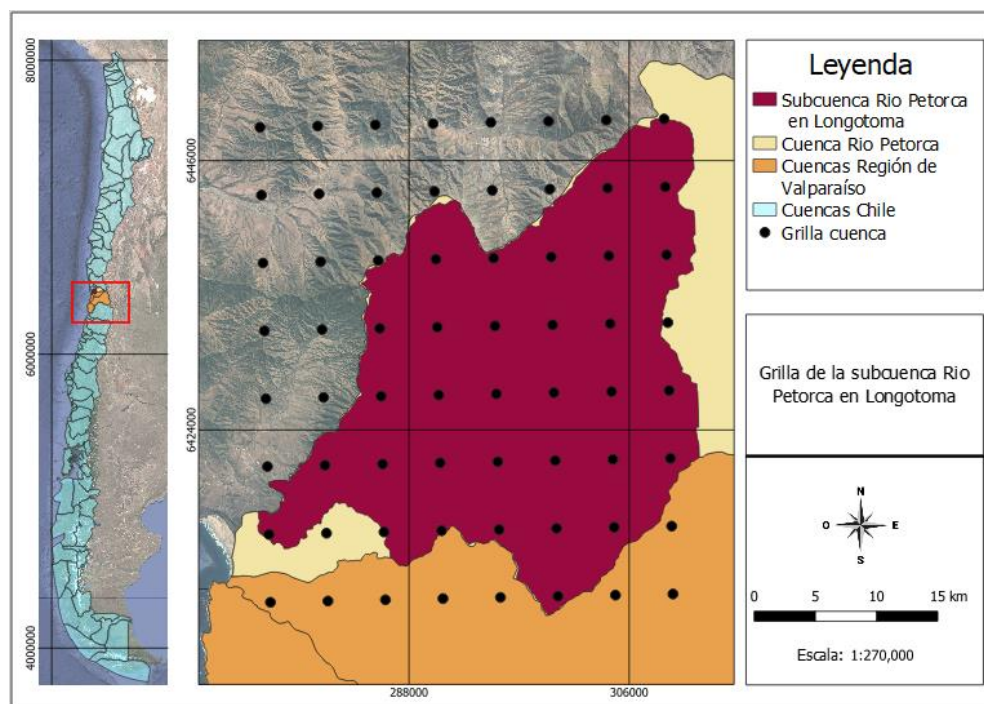


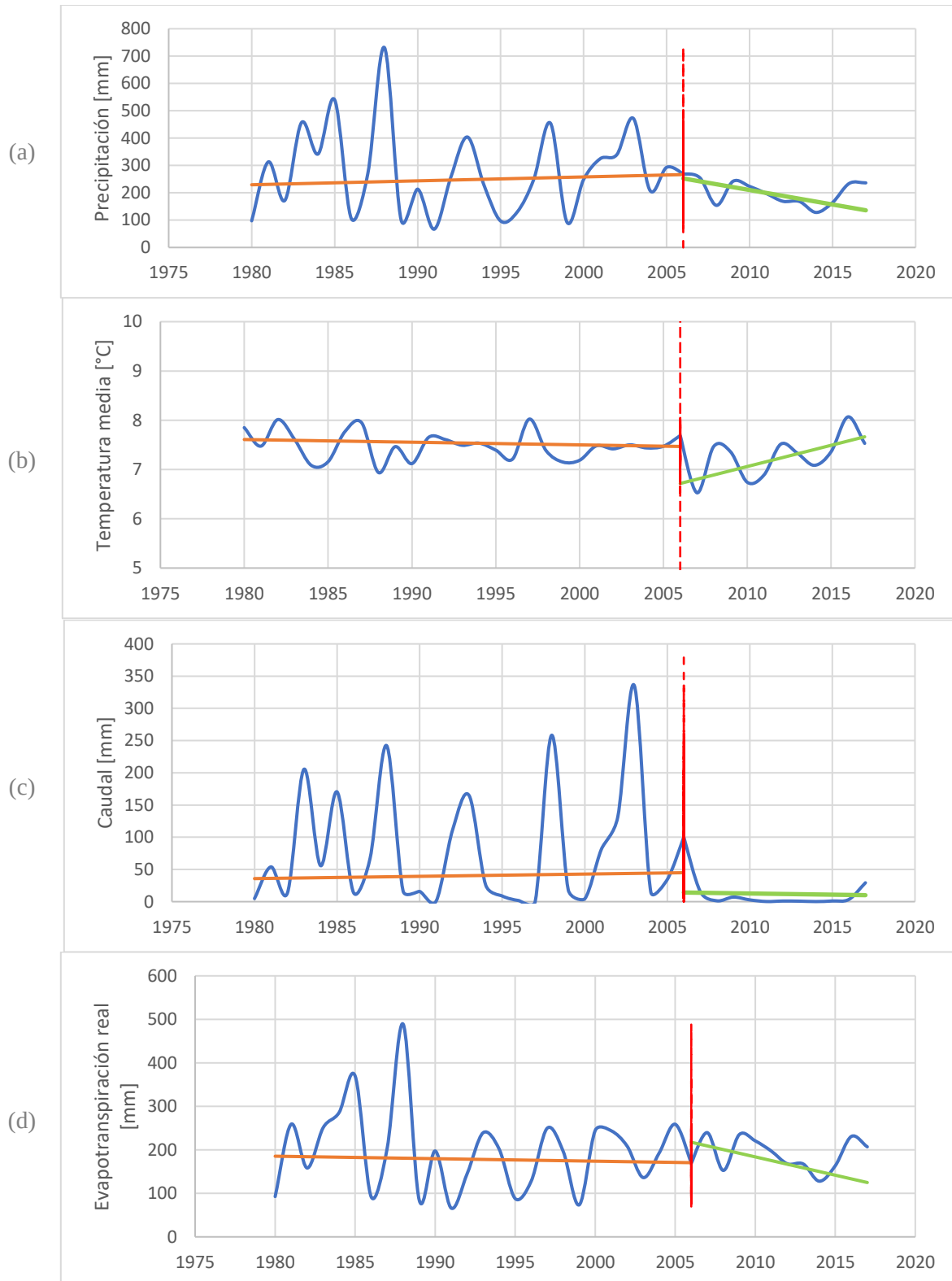
Figura 9: Puntos de la grilla en la subcuenca del Río Petorca en Longotoma

Luego, teniendo todos los valores ya mencionados, y utilizando las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) presentadas anteriormente, es posible calcular un valor de evapotranspiración para cada punto de la grilla, con lo que finalmente se obtiene un valor medio para la cuenca.

6 Resultados y análisis

En primer lugar, se aplica el test de Pettitt con un nivel de significancia del 0,05, el cual entrega que el año en que se muestra un cambio en la tendencia del caudal es el **año 2006**, lo que coincide con lo presentado por Eduardo Moraga (2018). A partir de este valor, se obtienen los periodos 1 (1980-2006) y 2 (2007-2017) necesarios para el estudio, y se aplica el método no paramétrico de Mann-Kendall, con un nivel de significancia del 0,05, a cada una de las series hidrológicas. Esto con la finalidad de analizar la tendencia de las series en ambos periodos, considerando su respectiva pendiente de Theil Sen. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

A continuación, se presentan las series de tiempo de precipitación, temperatura media, caudal y evapotranspiración real y potencial, con la pendiente correspondiente para ambos periodos.



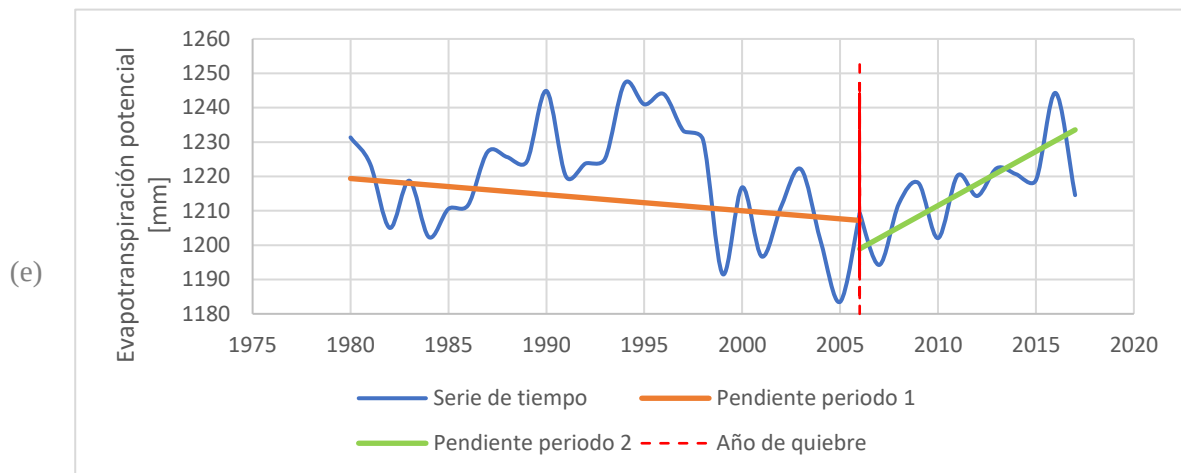


Figura 10: Serie de tiempo hidrológica de precipitación (a), temperatura (b), caudal (c), evapotranspiración real (d) y evapotranspiración potencial (e) de la cuenca.

Tabla 5: Resultados análisis de tendencia.

Serie	Periodo 1			Periodo 2		
	Z	p-value	Pendiente	Z	p-value	Pendiente
Precipitación	0,037	0,802	1,429	-0,378	0,152	-10,592
Temperatura media	-0,088	0,532	-0,005	0,378	0,152	0,086
Caudal	0,054	0,708	0,351	-0,333	0,211	-0,372
Evapotranspiración real	-0,065	0,646	-0,573	-0,378	0,152	-8,416
Evapotranspiración potencial	-0,145	0,297	-0,469	0,644	0,012	3,150

En la Figura 10 se presentan las series de tiempo de las variables hidrológicas consideradas en el estudio. De este se puede mencionar que:

- Precipitación (a): se presenta una leve tendencia ascendente en el primer periodo, y una tendencia descendente en el segundo.
- Temperatura (b): no presenta tendencia notoria en el periodo 1, a diferencia del segundo en que se observa una tendencia ascendente.
- Caudal (c): no presenta tendencia notoria en ninguno de los dos periodos (levemente ascendente en el primero, y levemente descendente en el segundo). Si se evidencia una menor oscilación en los datos en el periodo 2.
- Evapotranspiración real (d): en ambos periodos se presenta una tendencia descendente, siendo mayor en el periodo 2.
- Evapotranspiración potencial (e): el primer periodo presenta una tendencia descendente, y el segundo periodo una tendencia ascendente mucho más notoria.

A partir de la Figura 10 y la Tabla 5 se puede mencionar que en el periodo 2 se presentan tendencias más fuertes que en el periodo 1, y que la única serie cuya tendencia es estadísticamente significativa corresponde a la serie de evapotranspiración potencial (periodo 2), dado que presenta un p-value menor al nivel de significancia considerado. Esto se debe a que, al dividir la serie de tiempo en ambos periodos, éstos presentan una menor cantidad de datos, lo que limita la capacidad de detectar tendencias

significativas. A pesar de esto, se puede observar que el cambio en la tendencia de precipitación entre el periodo 1 y el periodo 2 es mayor que el cambio de la tendencia de evapotranspiración real, lo que, según lo mencionado en el marco teórico, correspondería a que la variación de caudal es en mayor medida debido al cambio climático. Además, la tendencia de la evapotranspiración potencial sufre un mayor cambio que la de evapotranspiración real.

A continuación, se aplican las ecuaciones de Budyko, siguiendo el procedimiento presentado para calcular la variación de caudal total considerando los periodos 1 y 2 ya mencionados. A modo de ejemplo, en la siguiente figura se muestra una de las curvas de Budyko obtenidas.

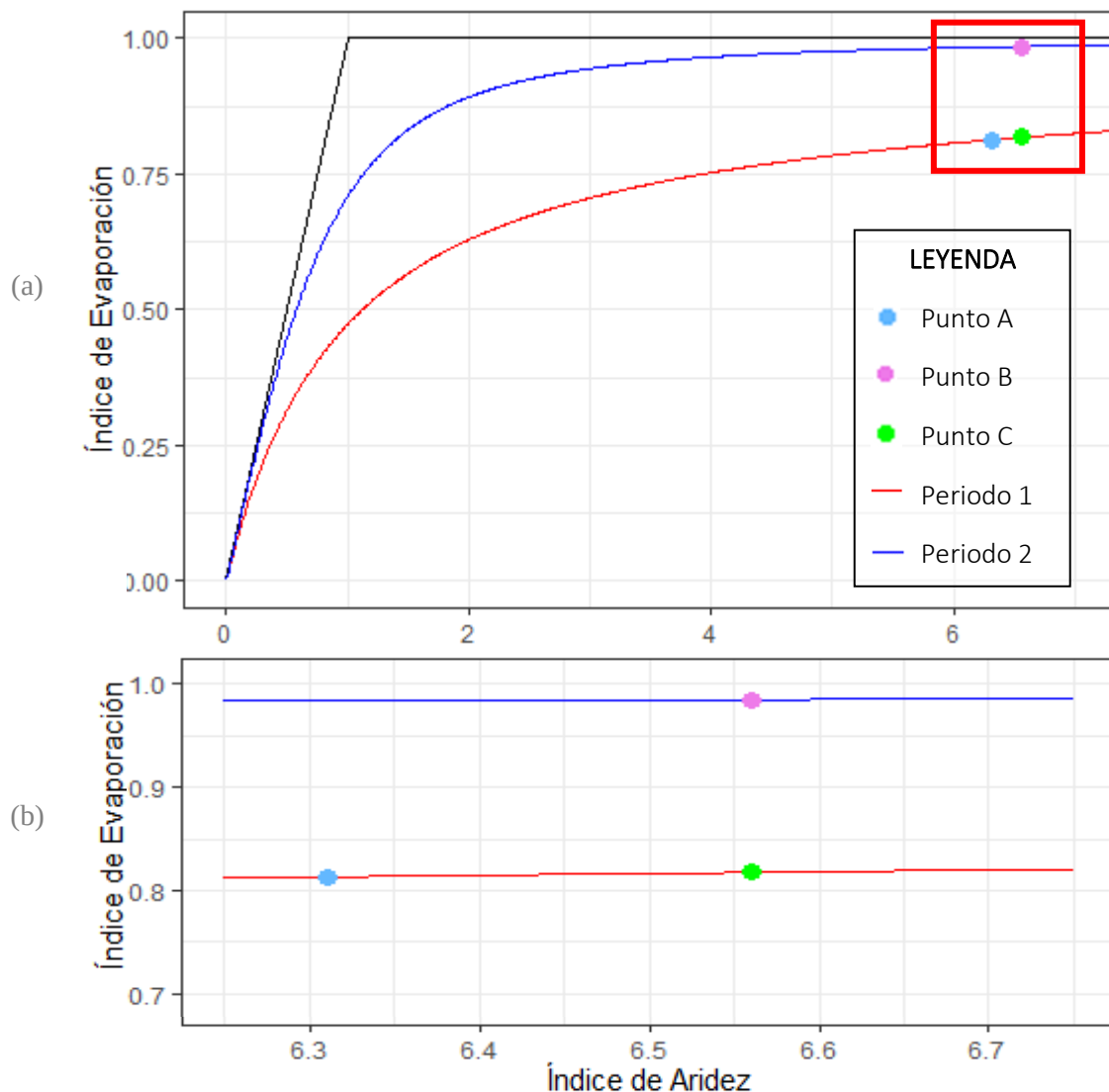


Figura 11: (a) Curva de Budyko utilizando la ecuación de Fu y el método de evapotranspiración de la FAO; (b) Acercamiento de los puntos A, B y C de la curva de Budyko.



En la Figura 11(a) se puede apreciar que el punto B presenta ambos desplazamientos, horizontal y vertical, con respecto al punto A, siendo éstos las posiciones de la cuenca en el periodo 2 y periodo 1, respectivamente. Se evidencia también en la Figura 11(b) que la posición de la cuenca se desplaza más en forma horizontal que vertical entre ambos periodos. El desplazamiento horizontal con respecto al punto A se identifica como el punto C, que representa el cambio de caudal debido únicamente al cambio climático. En la Tabla 6 se muestran los valores de los índices de aridez y de evaporación de cada punto.

Al comparar los valores del punto B con el punto A, se evidencia que la diferencia entre los índices de aridez (0,249) es mayor que la diferencia entre los índices de evaporación (0,172), lo que significa que la variación en el caudal de la cuenca **se debe en mayor proporción al cambio climático**. Esto concuerda con lo obtenido en el análisis de variación de tendencias entre evapotranspiración potencial y evapotranspiración real, y entre precipitación y evapotranspiración real, mencionado anteriormente.

Tabla 6: Índices de aridez y evaporación de cada punto para la curva de Budyko – Fu utilizando el método de evapotranspiración de la FAO.

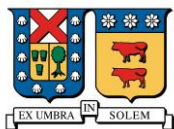
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6,311	0,813
B	6,560	0,985
C	6,560	0,817

El gráfico de la Figura 11 corresponde a la ecuación Budyko – Fu (ecuación (3)) utilizando el método de evapotranspiración de la FAO (ecuación (10)). Los resultados entregados al utilizar las otras ecuaciones de Budyko y los otros métodos de evapotranspiración son muy similares a lo expuesto en dicha figura, por lo que solo se considera ésta como referencia, mientras que los otros resultados se presentan en Anexos.

Luego, al aplicar las ecuaciones (7), (8) y (9) de variación de caudal se obtiene que éste, desde el periodo 1 al periodo 2, disminuye 76,79 [mm] en promedio. En la siguiente tabla se presentan los valores de ΔQ obtenidos para cada una de las ecuaciones de Budyko y métodos de evapotranspiración, donde se puede observar que los valores no difieren en gran medida unos entre otros. Es relevante destacar que partir del método de evapotranspiración de la FAO y la curva Budyko – WT se obtiene la menor disminución de caudal, la cual equivale a 76,670 [mm]. Por otra parte, al utilizar el método de evapotranspiración de Penman y la curva Budyko – TP se observa la mayor reducción de caudal, cuyo valor es de 76,875 [mm] entre periodos. Así, se presenta una diferencia máxima de 0,205 [mm] entre métodos.

Tabla 7: Variación de caudal entre periodo 1 y periodo 2.

Variación de caudal [mm]				
Método de evapotranspiración	Ecuación de Budyko			
	Fu	Turc - Pike	Wang - Tang	Zhang
FAO	-76,844	-76,867	-76,670	-76,782
Hargreaves	-76,840	-76,864	-76,672	-76,786
Priestley - Taylor	-76,846	-76,846	-76,674	-76,869
Penman	-76,852	-76,875	-76,674	-76,788



Para demostrar el impacto que tiene el cambio climático y la acción del ser humano en esta disminución de caudal se presentan las siguientes tablas, en las que se evidencia el aporte de cada uno al valor total de ΔQ .

Tabla 8: Porcentaje de aporte del cambio climático al cambio de caudal total.

Método de evapotranspiración	Ecuación de Budyko			
	Fu	Turc - Pike	Wang - Tang	Zhang
FAO	57,8%	59,1%	59,4%	64,4%
Hargreaves	57,6%	58,9%	59,3%	64,9%
Priestley - Taylor	57,8%	59,1%	59,4%	64,2%
Penman	57,9%	59,2%	59,5%	64,1%

Tabla 9: Porcentaje de aporte de la acción antropogénica local al cambio de caudal total.

Método de evapotranspiración	Ecuación de Budyko			
	Fu	Turc - Pike	Wang - Tang	Zhang
FAO	42,2%	40,9%	40,6%	35,6%
Hargreaves	42,4%	41,1%	40,7%	35,1%
Priestley - Taylor	42,2%	40,9%	40,6%	35,8%
Penman	42,1%	40,8%	40,5%	35,9%

En estas tablas se indica que el mayor contribuyente a la disminución del caudal corresponde al cambio climático global, ya que en todas las combinaciones de métodos se entrega que este aporte es superior al 55%. Específicamente, se tiene que en promedio la contribución relativa del cambio climático es de un 60,2%, mientras que la contribución de la acción antropogénica corresponde al 39,8%.

6.1 Incertidumbre

El estudio se realiza considerando 4 ecuaciones de Budyko y 4 métodos de evapotranspiración para obtener los resultados, lo que tiene como finalidad, tal como se menciona en los objetivos, evaluar la incertidumbre de utilizar uno u otro método.

Dados los resultados de cambio de caudal obtenidos y presentados anteriormente, se realiza un diagrama de caja y bigotes (boxplot) entre todos los valores obtenidos a partir de los 4 métodos de evapotranspiración y las 4 curvas de Budyko, lo que se presenta en la Figura 12.

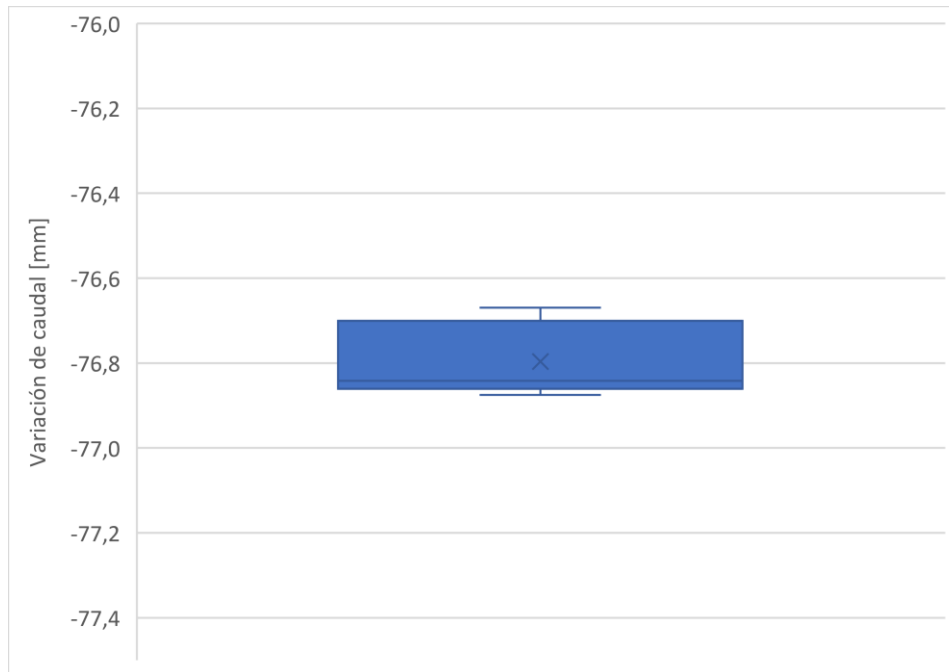


Figura 12: Boxplot de variación de caudal entre periodos 1 y 2 para todas las combinaciones de métodos de evapotranspiración y curvas de Budyko.

En la Figura 12 se observa que los valores se encuentran concentrados y se advierte una casi nula variación entre ellos. En la caja se obtienen los percentiles 75 y 25, cuyos valores son $-76,75 [mm]$ y $-76,85 [mm]$ respectivamente, representados por los límites superior e inferior de la caja, entregando así un rango de variabilidad en total de $0,1 [mm]$. Además, se obtiene la mediana, cuyo valor es igual a $-76,84 [mm]$, y es representada por la línea horizontal dentro de la caja en la figura, y la media, con un valor de $-76,79 [mm]$, representada por la “x” dentro de la caja.

Al analizar los resultados producto de utilizar diferentes métodos de Budyko, pero el mismo método de evapotranspiración, se obtiene que en casi todas las situaciones la curva Budyko – TP entrega el mayor ΔQ , excepto con el método de Priestley – Taylor, en el que el mayor valor de ΔQ es obtenido por Budyko – Zh. En cuanto a la menor variación de caudal, ésta se adquiere mediante la curva Budyko – WT, como se indica la Tabla 10.

Por otra parte, se obtiene el respectivo rango de variación al fijar el método de evapotranspiración, analizando la diferencia entre los valores máximo y mínimo de ΔQ , y se observa que el método que entrega menor incertidumbre corresponde al de Hargreaves ($0,192 [mm]$), mientras que el método de Penman es el que presenta más incertidumbre ($0,201 [mm]$).

Tabla 10: Rango de variabilidad a partir de método de evapotranspiración fijo y curva de Budyko variable.

Método de evapotranspiración	Max ΔQ		Min ΔQ		Diferencia $[mm]$
	$\Delta Q [mm]$	Budyko	$\Delta Q [mm]$	Budyko	
FAO	-76,867	TP	-76,670	WT	0,198
Hargreaves	-76,864	TP	-76,672	WT	0,192
Priestley - Taylor	-76,869	Zhang	-76,674	WT	0,196
Penman	-76,875	TP	-76,674	WT	0,201



De la misma manera, se analiza la situación en que se considera constante la curva de Budyko, pero con diferentes métodos de evapotranspiración, cuyos resultados se presentan en la Tabla 11. En este caso se obtiene que la diferencia entre considerar un método u otro es aún menor que en la situación anterior, variando entre 0,004 y 0,087 [mm] dependiendo de la curva de Budyko. Se tiene que el menor rango de variabilidad lo entrega la curva Budyko – WT, mientras que el mayor se obtiene a partir de la curva Budyko – Zh.

Además, se puede mencionar que el mayor valor de ΔQ lo entrega la evapotranspiración de Penman para casi todas las curvas, exceptuando la curva Budyko – Zh, en la que el mayor valor es obtenido por el método de Priestley – Taylor. De la misma manera se analizan los menores valores, los cuales son adquiridos por diferentes métodos de evapotranspiración. En el caso de las curvas Budyko – WT y Budyko – Zh, la menor variación de caudal es obtenida mediante la evapotranspiración de la FAO; para la curva Budyko – TP el método de Priestley – Taylor es el que entrega el menor valor; y, finalmente, para la curva Budyko – Fu la menor variación se obtiene por la evapotranspiración de Hargreaves.

Tabla 11: Rango de variabilidad a partir de curva de Budyko fija y método de evapotranspiración variable.

Budyko	Max ΔQ		Min ΔQ		Diferencia [mm]
	ΔQ [mm]	Método ET	ΔQ [mm]	Método ET	
Fu	-76,852	Penman	-76,840	Hargreaves	0,012
Turc – Pike (TP)	-76,875	Penman	-76,846	PT	0,029
Wang – Tang (WT)	-76,674	Penman	-76,670	FAO	0,004
Zhang (Zh)	-76,869	PT	-76,782	FAO	0,087

Esto se representa en la Figura 13, en la que se muestra la distribución de los datos para el caso de análisis considerando el método de evapotranspiración fijo con las 4 curvas de Budyko, y la curva de Budyko fija con los 4 métodos de evapotranspiración. En éstos se observa gráficamente que al fijar la evapotranspiración se obtiene una mayor incertidumbre que al fijar la ecuación de Budyko, aunque en ambos la diferencia es bastante leve.

Además, se reafirma que, entre los métodos de evapotranspiración, el método de Penman es el que presenta mayor incertidumbre, y que la menor es entregada por el método de Priestley – Taylor (Figura 13(a)). Entre las ecuaciones de Budyko, la curva que entrega una mayor incertidumbre es la de Zhang, mientras que la menor lo entrega la curva de Wang – Tang. Igualmente, con respecto a las curvas de Budyko se ratifica que la que entrega el menor valor de ΔQ es la curva Budyko – WT, y que el mayor lo entrega la curva Budyko – TP (Figura 13(b)).

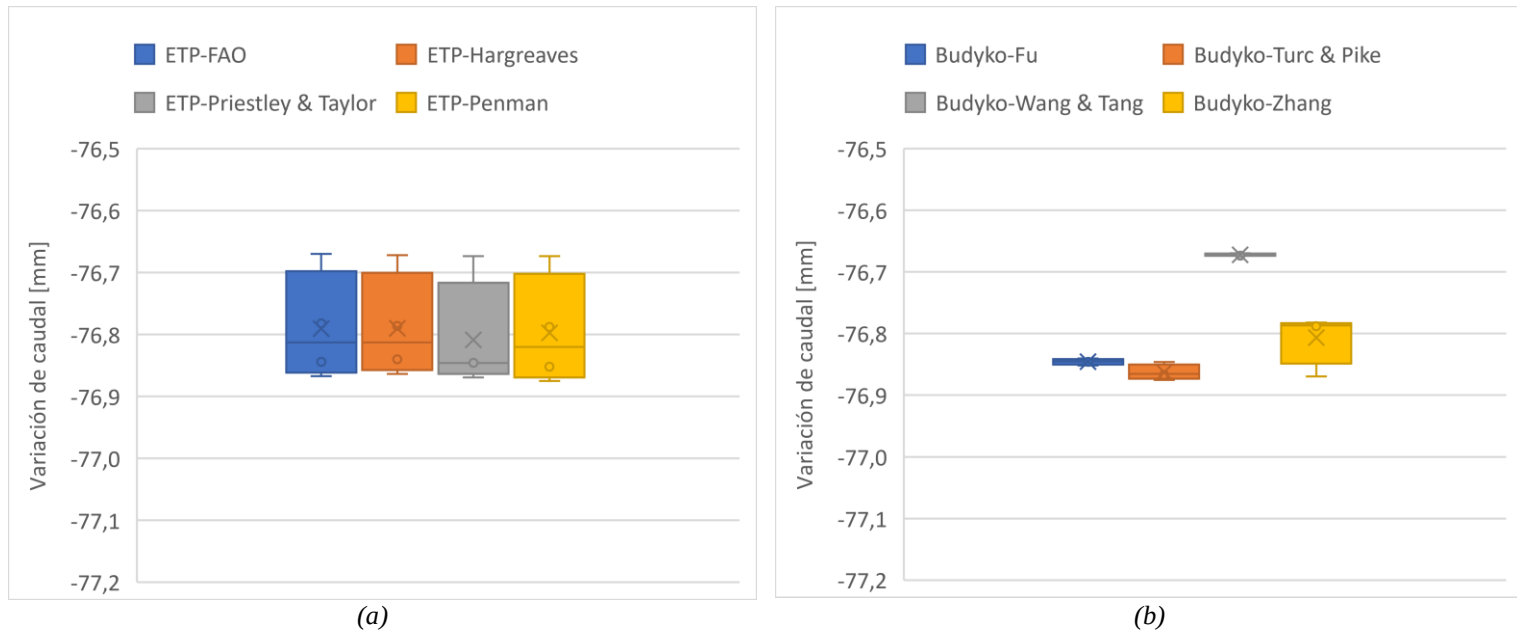
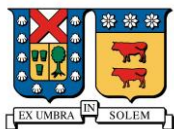


Figura 13: Boxplot considerando: (a) un método de evapotranspiración fijo y sus respectivos valores obtenidos por los 4 métodos de Budyko, y (b) un método de Budyko fijo y sus respectivos valores obtenidos por los 4 métodos de evapotranspiración potencial.



7 Conclusiones

En este estudio realizado en la subcuenca Río Petorca en Longotoma se busca encontrar cuál es el porcentaje en que contribuye a la variación de escorrentía el cambio climático y la acción antropogénica de la zona. Para lograr este objetivo, en distintas partes del mundo se ha considerado la hipótesis de Budyko, en la que se utiliza, principalmente, la información de las series de tiempo de precipitación, evapotranspiración real y evapotranspiración potencial, a partir de las cuales es posible formular las curvas de Budyko.

Al aplicar la prueba no paramétrica de Pettitt, se identificó un punto de cambio en la tendencia de la serie de caudal en el año 2006. Este cambio se refleja también en los gráficos de las series de tiempo de las variables hidrológicas consideradas (Figura 10). Posteriormente, se identifican los periodos antes y después del cambio, y se aplicaron las pruebas de Mann – Kendall y Theil Sen. Aunque los resultados obtenidos no son estadísticamente significativos, éstos indican que las tendencias en el periodo posterior a la fecha de cambio son más notorias que en el periodo previo al cambio. Se aprecia también que la tendencia de la precipitación presenta un cambio más drástico que la tendencia de evapotranspiración real, sin embargo, el cambio de tendencia en la evapotranspiración potencial supera al de la evapotranspiración real.

Luego, la curva de Budyko revela que el cambio climático global es el factor principal que contribuye a la variación de la escorrentía en la cuenca dado que el índice de aridez (ETP/P) muestra un cambio más significativo que el índice de evaporación (ET/P). Esto se refleja en los resultados numéricos del cambio de caudal, que indican una disminución de 76,79 [mm] entre el caudal del periodo 1 y del periodo 2, disminución en la cual el cambio climático representa un 60,2%, mientras que la acción antropogénica representa un 39,8%.

A pesar de que los resultados indican que el cambio climático contribuye en mayor medida a la disminución del caudal de la cuenca, es posible notar que, de igual forma, la influencia humana presenta un alto porcentaje de aporte. Esto es debido al aumento de la agricultura en la zona, principalmente plantaciones de limones y paltos, que corresponde a una de las actividades económicas más fuertes del sector, afectando así la disponibilidad del recurso hídrico.

Por otro lado, se estudia la incertidumbre resultante del uso de diferentes métodos de evapotranspiración y ecuaciones de Budyko. Se observa que, al considerar las distintas combinaciones posibles, no se obtiene una gran variación en los resultados de ΔQ , obteniendo de esta forma una diferencia máxima de 0,205 [mm]. Se identifica que, al mantener constante una ecuación de Budyko y variar el método de evapotranspiración, se encuentran diferencias ligeras entre los resultados, pero son poco evidentes. En contraste, al comparar los valores obtenidos de mantener constante un método de evapotranspiración y usar distintas ecuaciones de Budyko, es posible notar una mayor variabilidad, aunque ésta sigue siendo muy leve. Esto sugiere que la elección del método de evapotranspiración influye en mayor cantidad en los resultados que la elección de la ecuación de Budyko.

Además, se obtiene que las mayores incertidumbres se presentan al utilizar el método de evapotranspiración de Hargreaves y la ecuación de Budyko – Zhang, al contrario del método de evapotranspiración de Penman y la ecuación de Budyko – Wang & Tang, los cuales proporcionan la menor incertidumbre en los resultados. Por lo tanto, es recomendable usar esta última combinación.

Finalmente, cabe mencionar que en los métodos utilizados para obtener la evapotranspiración se considera un cultivo genérico de referencia, por lo que, para obtener valores que se acerquen más a la realidad, se recomienda utilizar el factor específico de los cultivos de la zona. Además, es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos se basan en una serie de tiempo de 37 años, sin embargo, al dividirla en dos periodos, se observa que no se logra obtener un análisis de tendencia adecuado, por lo que se recomienda considerar series de tiempo más extensas.



8 Bibliografía

- Alencar da Silva Alves, K. M., & Silva Nóbrega, R. (2017). *TENDENCIA PLUVIOMETRICA Y CONCENTRACIÓN ESTACIONAL DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MOXOTÓ - PERNAMCUCO - BRASIL*. Revista Geográfica de América Central.
- Amulén, F., UC, C. d., & UC., C. d. (2019). *Pobres de Agua: Radiografía del agua rural en Chile*.
- Budyko, M. (1974). *Climate and Life*. Academic press.
- CIREN. (2016). *Región de Valparaíso, Provincia de Petorca, Comuna de Petorca. Recursos Naturales y Proyectos*.
- CR2. (21 de Septiembre de 2021). Obtenido de Center for Climate and Resilience Reserch: <https://www.cr2.cl/crisis-hidrica-en-la-cuenca-del-rio-petorca/>
- Dey, P., & Mishra, A. (2017). *Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions*. Journal of Hidrology.
- DGA. (2018). *Informe Técnico: Evaluación del actual nivel de explotación de los acuíferos de La Ligua y Petorca*.
- Fragkou, M.-C., Monsalve-Tapia, T., Pereira-Roa, V., & Bolados-Arratia, M. (2022). *Abastecimiento de agua potable por camiones aljibe durante la megasequía. Un análisis hidrosocial de la provincia de Petorca, Chile*. Eure.
- Fu, B. (1981). *On the calculation of evaporation from land surface in mountainous areas*. Scientia Atmospherica Sinica.
- Gao, G., Fu, B. W., Liang, W., & Jiang, X. (2016). *Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework*. Science of the Total Environment.
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). *Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical test in Serbia*. Global and Planetary Change.
- Guan, X., Zhang, J., Yang, Q., & Wang, G. (2021). *Quantifying the effects of climate and watershed structure changes on runoff variations in the Tao River basin by using three different methods under the Budyko framework*. Theoretical and Applied Climatology .
- Hale, K., Wlostowski, A., Badger, A., Musselman, K., Livneh, B., & Molotch, N. (2021). *Modeling streamflow sensitivity to climate warming and surface water inputs in a montane catchment*. Journal of Hydrology.
- Jiang, C., Xiong, L., Wang, D., Liu, P., Guo, S., & Xu, C.-Y. (2015). *Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters*. Journal of Hydrology.
- Kendall, M. (1975). *Rank correlation measures*. Griffin.
- Krajewski, A., Sikorska-Senoner, A. E., Hejduk, L., & Banasik, K. (2021). *An Attempt to Decompose the Impact of Land Use and Climate Change on Annual Runoff in a Small Agricultural Catchment*. Water Resources Management 35.



- Lipczynska-Kochany, E. (2018). *Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater*. Total Environment.
- Ma, Z., Kang, S., Zang, L., Tong, L., & Su, X. (2008). *Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China*. Journal of Hydrology.
- Mann, H. (1945). *Non-parametric test against trend*. Econometrica.
- Miranda, F. (2018). *Erosión de Suelos y Crisis Hídrica: Las sombras del modelo agroexportador del Palto*. Terram.
- Moraga, E. (2018). *Petorca se reinventa luego de la crisis paltera*. El Mercurio.
- Mu, Z., Liu, G., Shuai, L., Fan, J., Qin, T., Li, Y., . . . Zhou, B. (2022). *Base Flow Variation and Attribution Analysis Based on the Budyko Theory in the Weihe River Basin*.
- Mueses, H. F. (2008). *Diferencias entre el nivel de significancia alfa y el valor P*. Revista Estomatología .
- Muñoz, A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garretón, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J., . . . Le Quesne, C. (2020). *Water crisis in Petorca Basin, Chile: The combined effects of a Mega-Drought and Water Management*. Water.
- Pettitt, A. N. (1979). *Non-Parametric Approach to the Changw-Point Problem*. Applied Statistics.
- Pike, J. G. (1964). *The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate*. Journal of Hydrology.
- Rivas- Tovar, L. (2015). *¿Cómo Hacer una Tesis de Maestría?*
- Roderick, M. L., & Farquhar, G. D. (2011). *A simple framework for relating variations in runoff to variation i climatic conditions and catchment properties*. Water Resources Research.
- Sen, P. (1968). *Estimates of teh regression coefficient based on Kendall's tau*. Journal of the American Statistical Association.
- Sharma, P., & Mondal, A. (2022). *Probabilistic Budyko-based Separation of Climate and Catchment Effects on Streamflow*. Journal of Hydrology.
- Theil, H. (1950). *A rank-invariant methodof the linear and polynomial regression analysis*. Nederlandse Akademie Wetenschappen Series A.
- Turc, L. (1953). *Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations*. Ann Agron.
- Wang, D., & Hejazi, M. (2011). *Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States*. Water Resource Research 47.
- Wang, D., & Tang, Y. (2014). *A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in darwinian hydrologic models*. Geophysical Research Letters.
- Yang, H., Yang, D., & Hu, Q. (2014). *An error analysis of the Budyko hypothesis for assessing the contribution of climate change to runoff*. Water Resources Research.

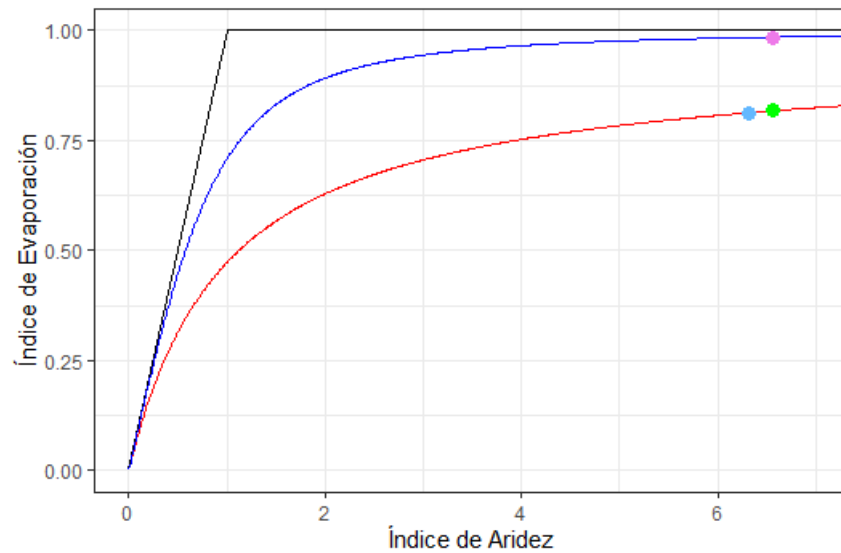


- Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale*. Water Resources Research.
- Zhang, L., Dawes, W., & Walker, G. (2001). *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale*. Water Resources Research 37.
- Zhang, X., Zhang, L., Zhao, J., Rustomji, P., & Hairsine, P. (2008). *Response of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China*. Water Resources Research.

9 Anexos

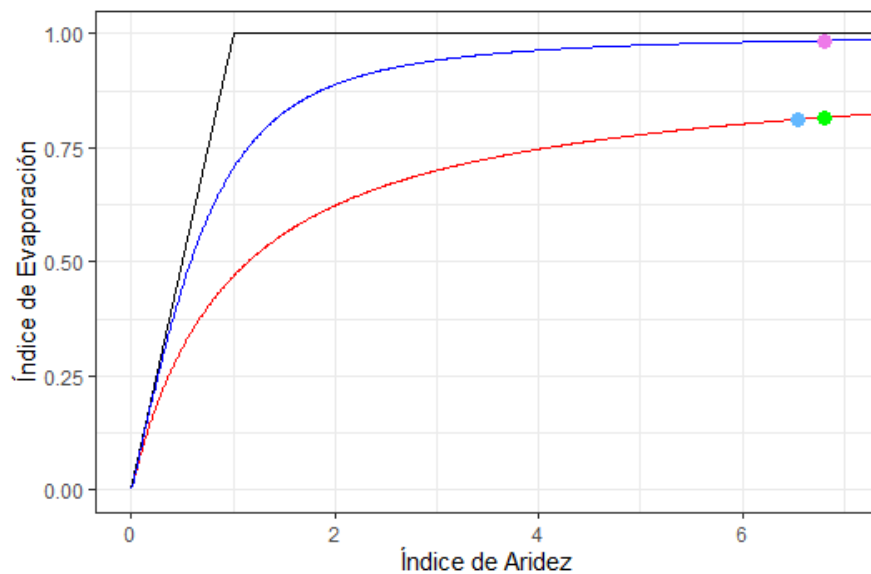
9.1 Curva de Buydko – Fu

9.1.1 Evapotranspiración FAO Penman – Monteith



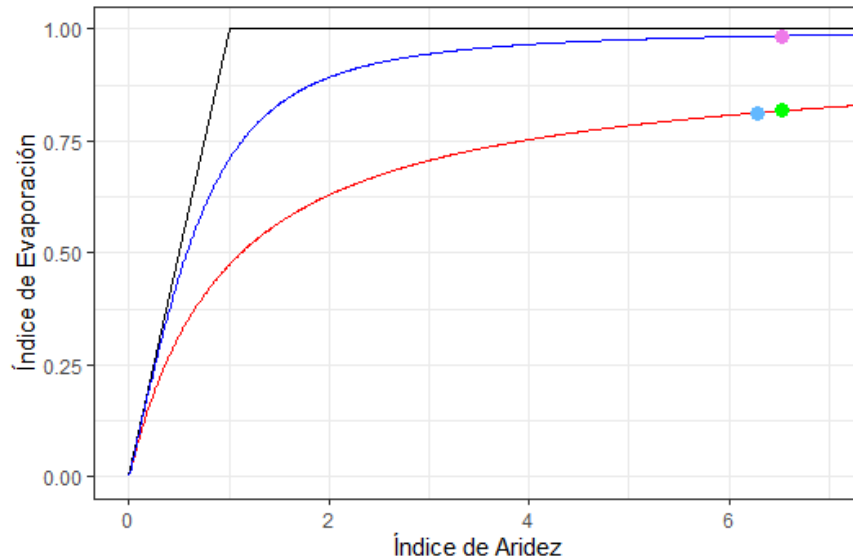
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.311	0.813
B	6.560	0.985
C	6.560	0.817

9.1.2 Evapotranspiración de Hargreaves



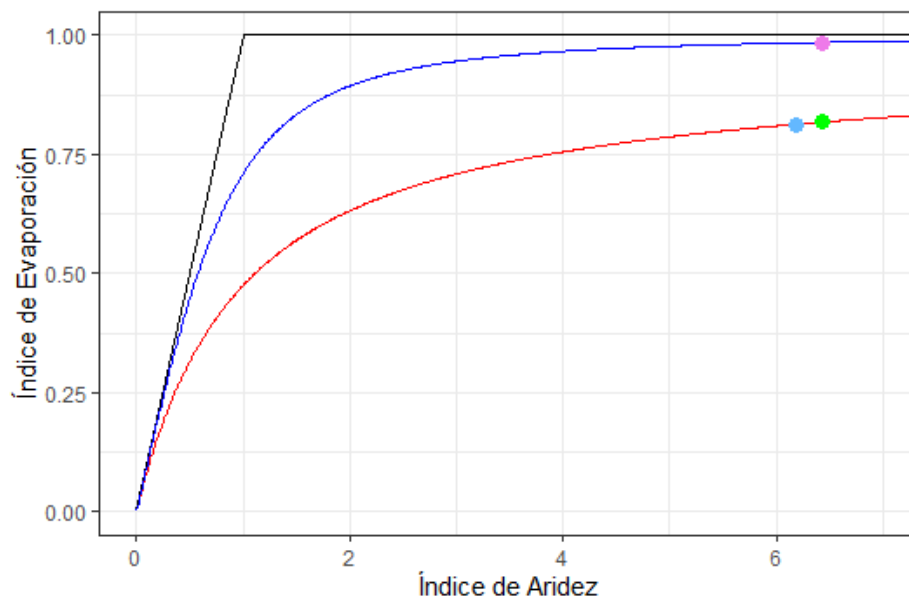
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.551	0.812
B	6.806	0.985
C	6.806	0.817

9.1.3 Evapotranspiración de Priestley – Taylor



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.284	0.813
B	6.528	0.985
C	6.528	0.817

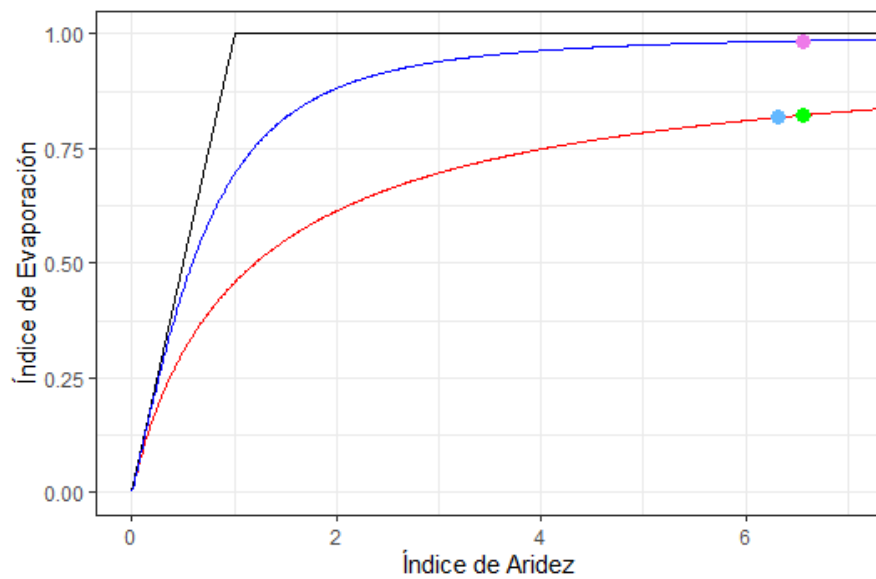
9.1.4 Evapotranspiración de Penman



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.189	0.814
B	6.436	0.985
C	6.436	0.818

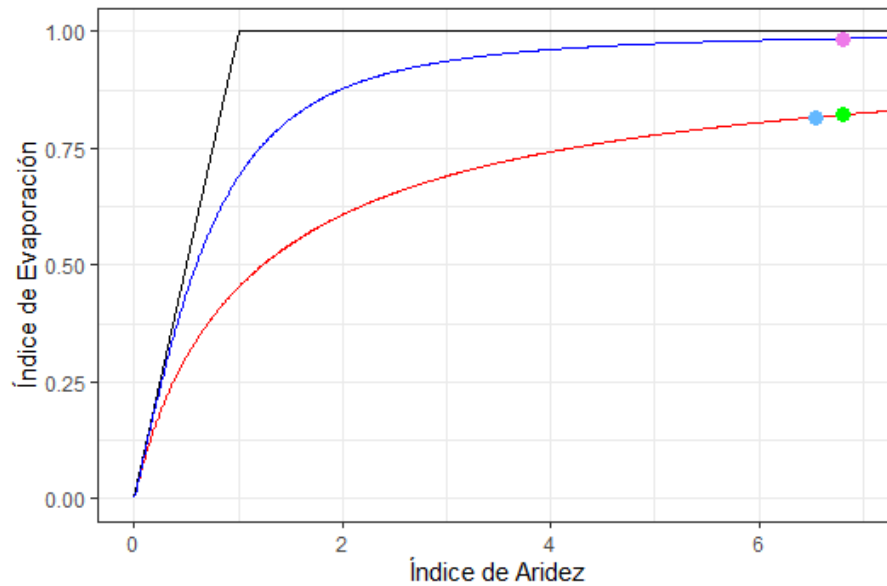
9.2 Curva de Budyko – Turc & Pike

9.2.1 Evapotranspiración FAO Penman – Monteith



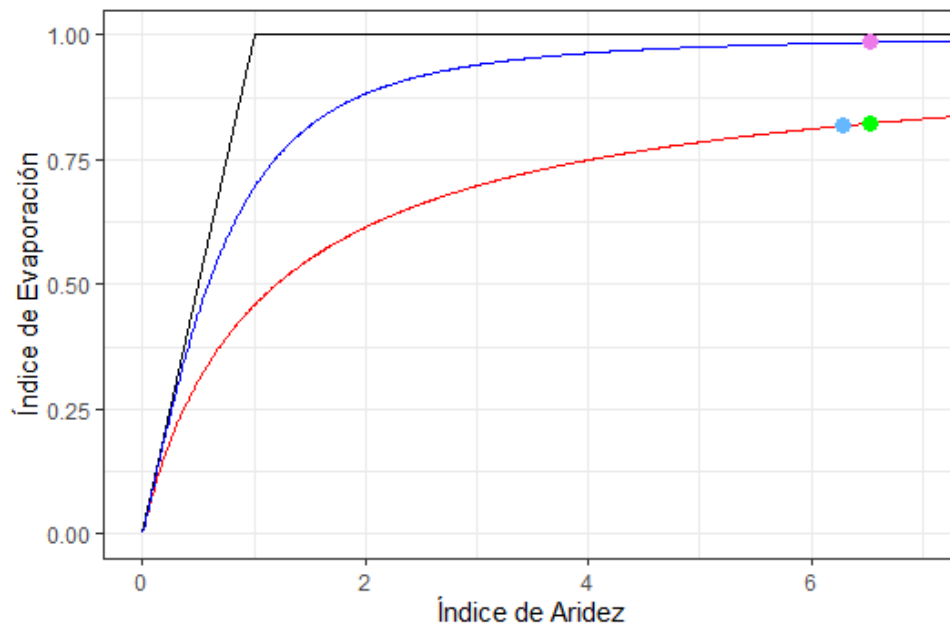
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.311	0.818
B	6.560	0.985
C	6.560	0.823

9.2.2 Evapotranspiración de Hargreaves



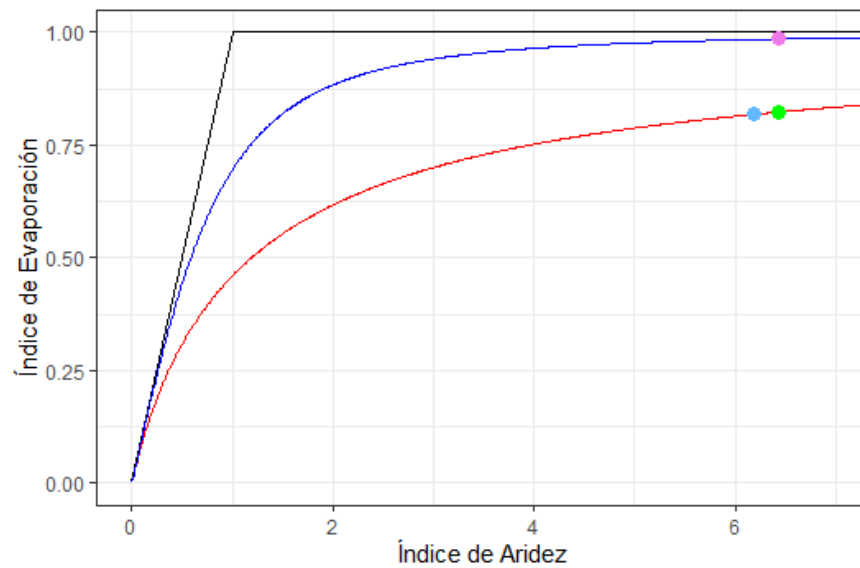
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.552	0.817
B	6.806	0.985
C	6.806	0.822

9.2.3 Evapotranspiración de Priestley – Taylor



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.284	0.818
B	6.528	0.985
C	6.528	0.823

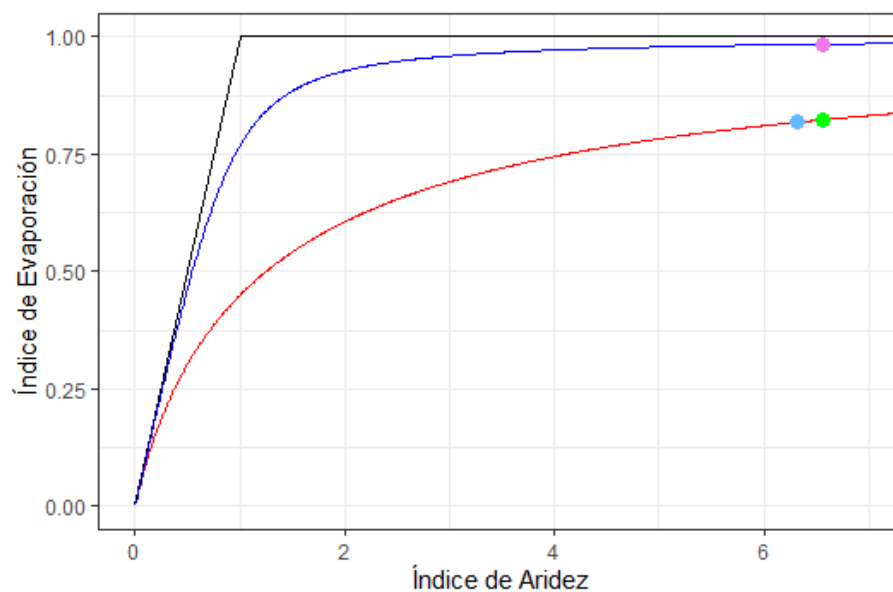
9.2.4 Evapotranspiración de Penman



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.189	0.818
B	6.436	0.985
C	6.436	0.823

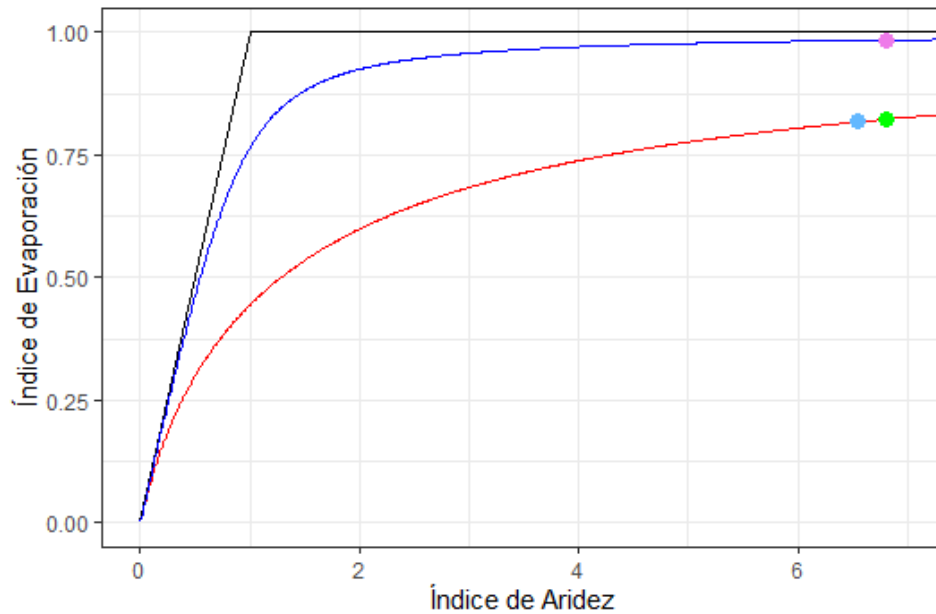
9.3 Curva de Budyko – Wang & Tang

9.3.1 Evapotranspiración FAO Penman – Monteith



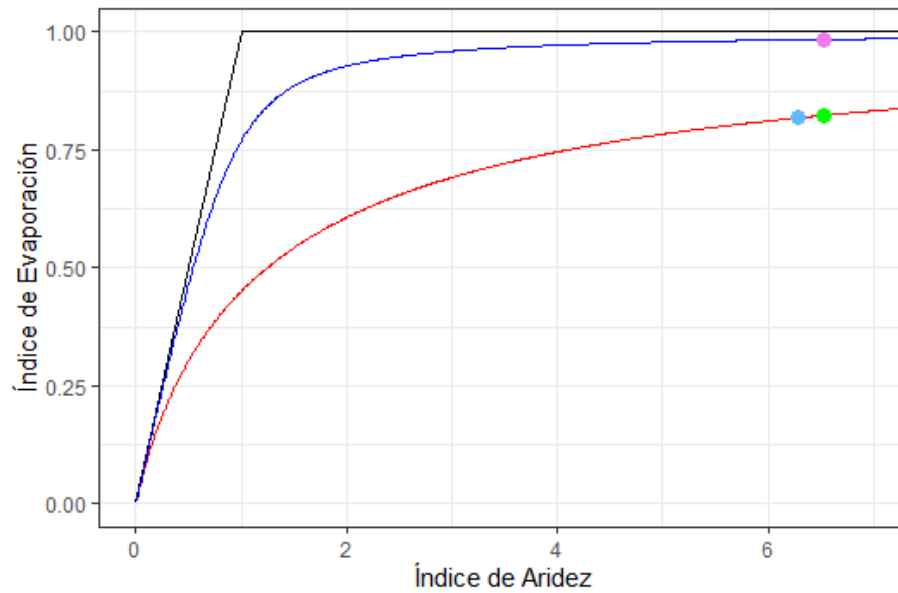
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.311	0.818
B	6.560	0.984
C	6.560	0.823

9.3.2 Evapotranspiración de Hargreaves



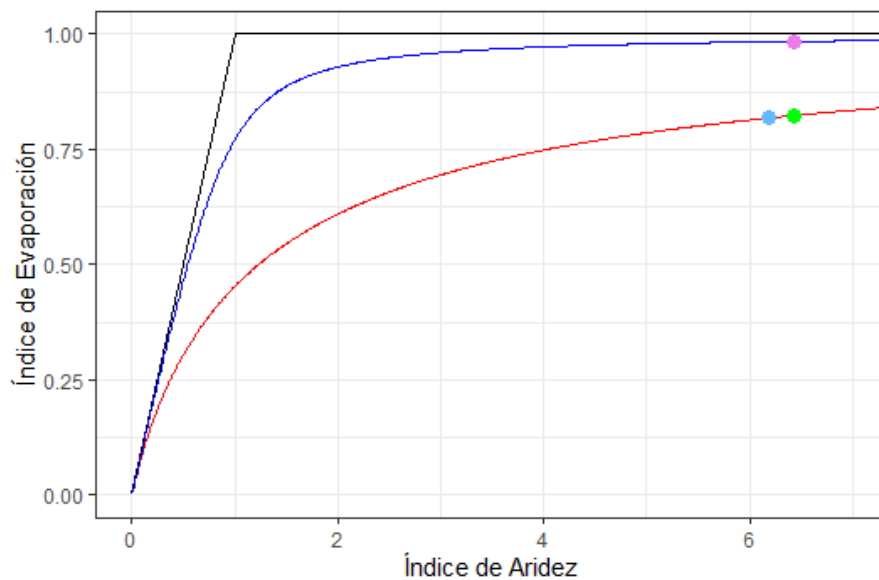
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.311	0.817
B	6.806	0.984
C	6.806	0.823

9.3.3 Evapotranspiración de Priestley – Taylor



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.284	0.818
B	6.528	0.984
C	6.528	0.823

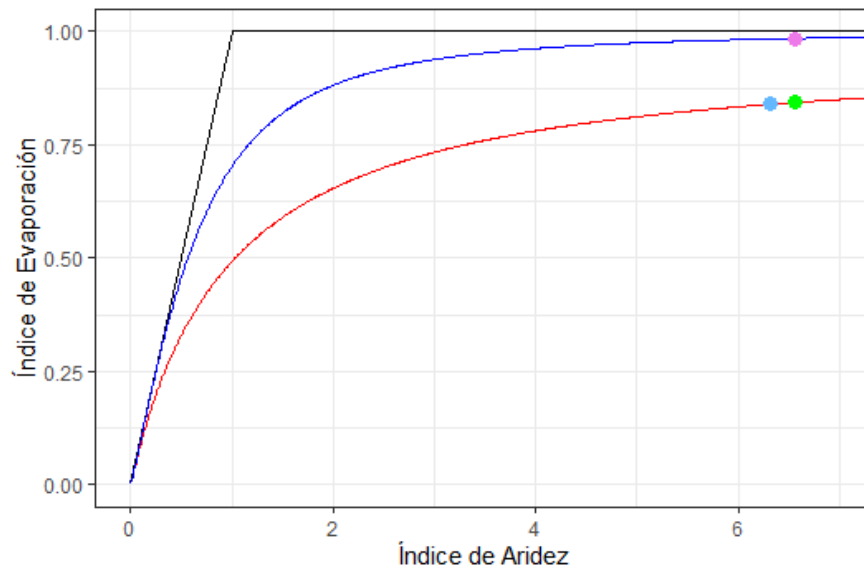
9.3.4 Evapotranspiración de Penman



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.189	0.818
B	6.436	0.984
C	6.436	0.824

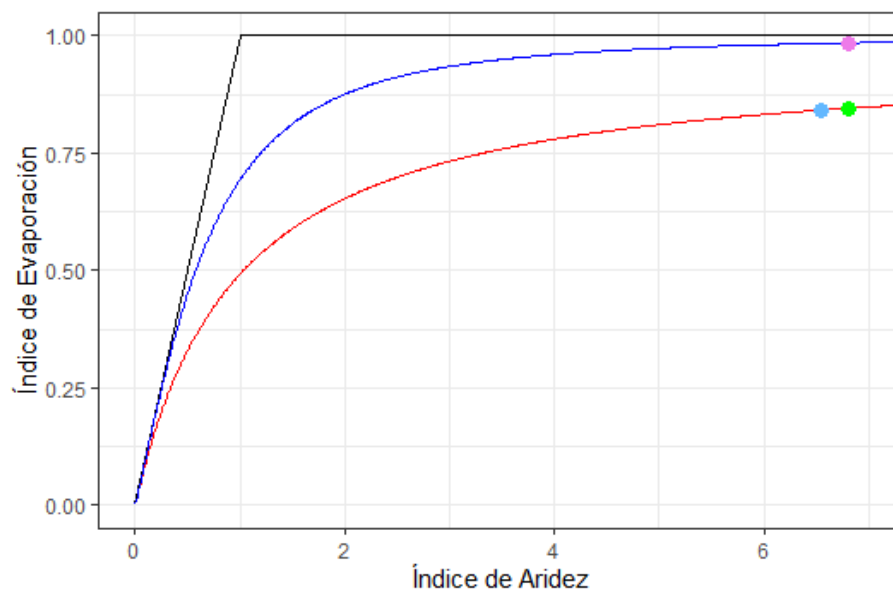
9.4 Curva de Budyko – Zhang

9.4.1 Evapotranspiración FAO Penman – Monteith



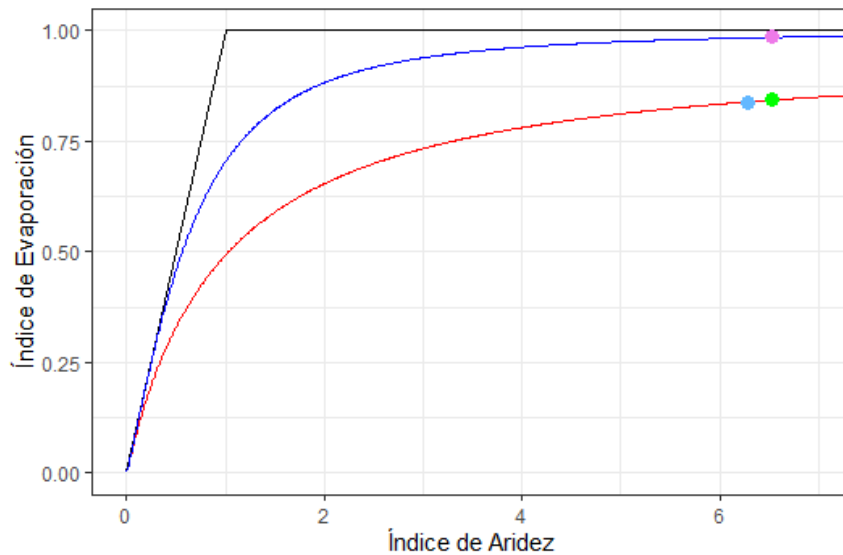
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.311	0.839
B	6.560	0.985
C	6.560	0.844

9.4.2 Evapotranspiración de Hargreaves



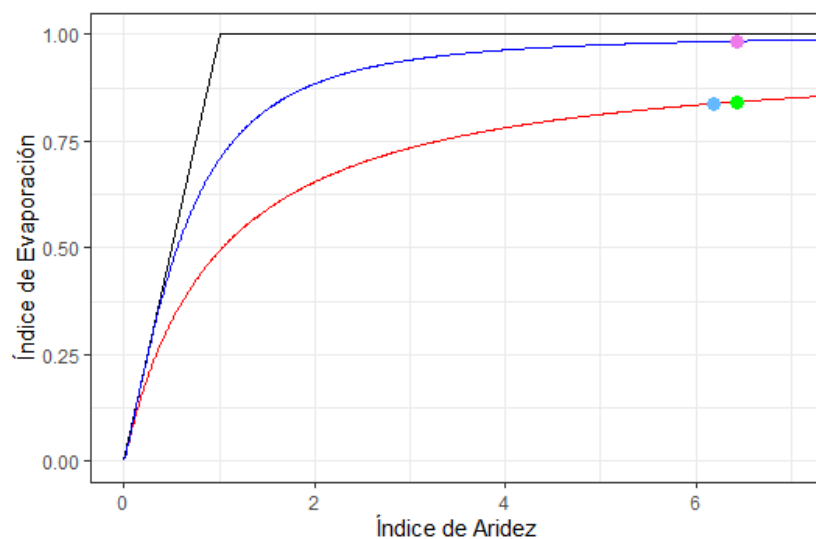
Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.551	0.842
B	6.806	0.985
C	6.806	0.846

9.4.3 Evapotranspiración de Priestley – Taylor



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.284	0.839
B	6.528	0.985
C	6.528	0.843

9.4.4 Evapotranspiración de Penman





UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES



Punto	Índice de aridez (ETP/P)	Índice de evaporación (ET/P)
A	6.189	0.838
B	6.436	0.985
C	6.436	0.843



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

