



Herramientas Desarrolladas Para la Actualización Balance Hídrico de Chile

Taller Planificación Estratégica de Recursos Hídricos en un contexto de Cambio Climático

Ximena Vargas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
Sebastian Vicuña, Escuela de Ingeniería, Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile

Agosto 2019

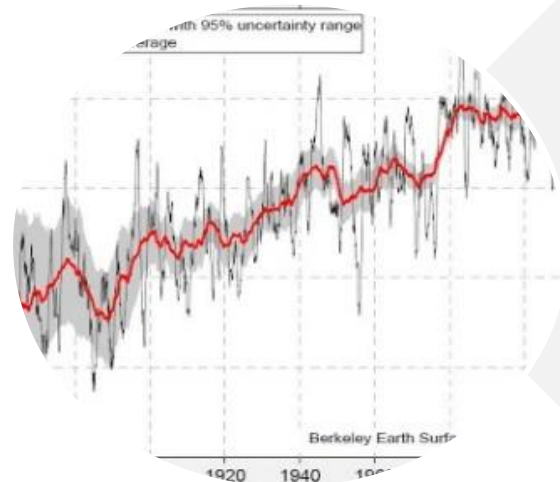
Contenido

- Objetivos del proyecto
- Etapas del Proyecto
- Enfoque Metodológico
- Uso de los resultados del nuevo Balance Hídrico de Chile

Objetivos del Proyecto



Definir y aplicar una metodología para realizar una actualización del balance hídrico a nivel nacional, considerando la calidad y cantidad de información disponible..



Analizar los efectos del cambio climático sobre los componentes del balance hídrico.

Etapas del Proyecto

Etapa 1: Metodología para la actualización del Balance Hídrico Nacional (2016-2017)

Etapa 2: Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro (2017-2018)

Etapa 3: Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral (2018-2019)

Etapa 4: Aplicación de Metodología para la Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Parte Sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua (2019)

Etapas del Proyecto

Evolución metodológica balance

Etapa 1

- Elección de cinco cuencas piloto.
- Desarrollo de CR2-Met.
- Recopilación de información hidrológica.
- Implementación y evaluación de modelo VIC.
- Cambio climático.

Etapa 2

- **Análisis de CAMELS-CL.**
- **Selección de cuencas en régimen natural (41).**
- Actualización de CR2-Met.
- **Calibración automática de VIC (SCE-UA).**
- **Similitud cuenca-pixel y regionalización de parámetros.**
- Verificación de procesos hidrológicos.
- Incorporación de **aporte glaciar** y riego.
- **Cambio climático.**

Etapa 3

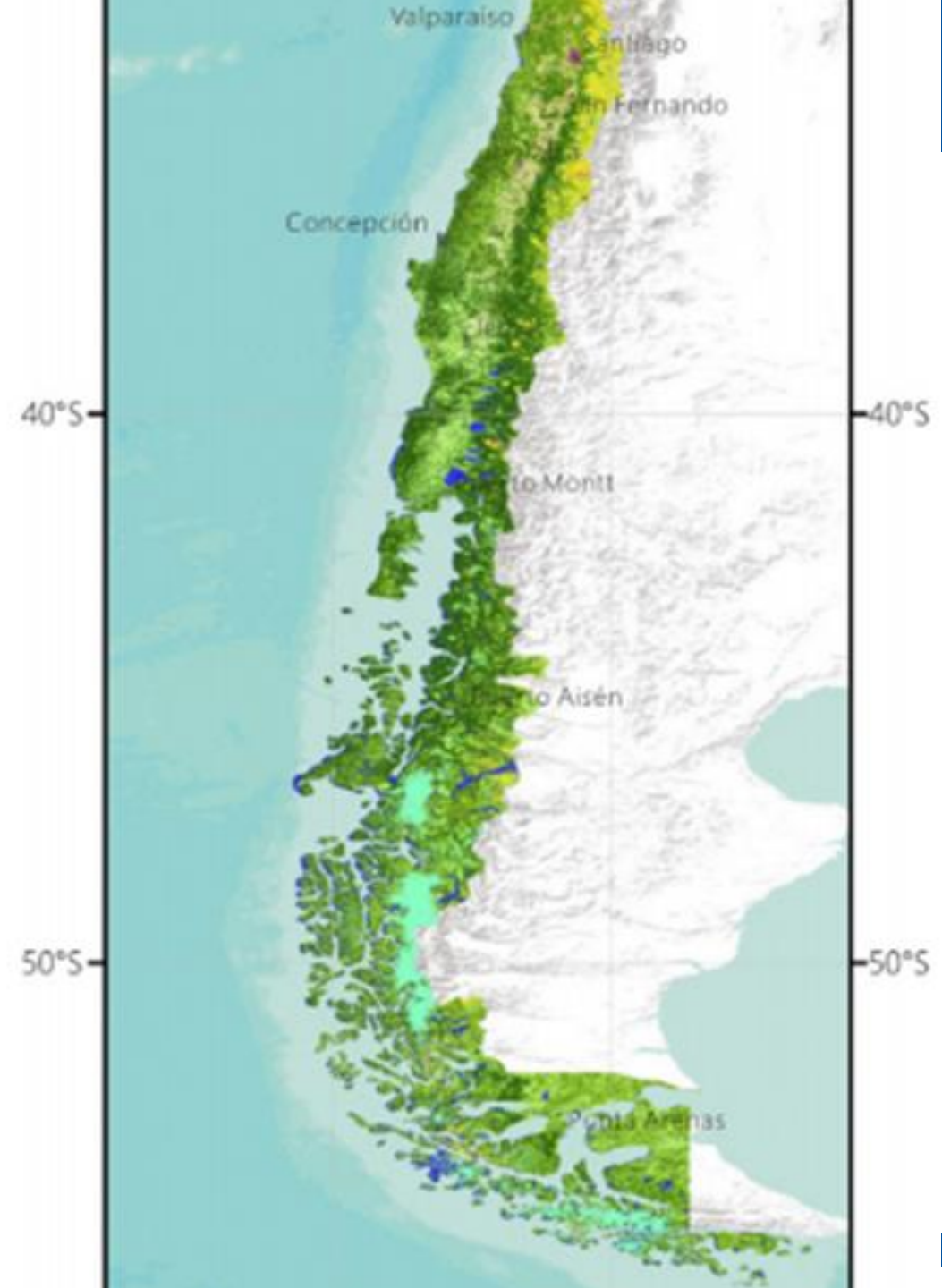
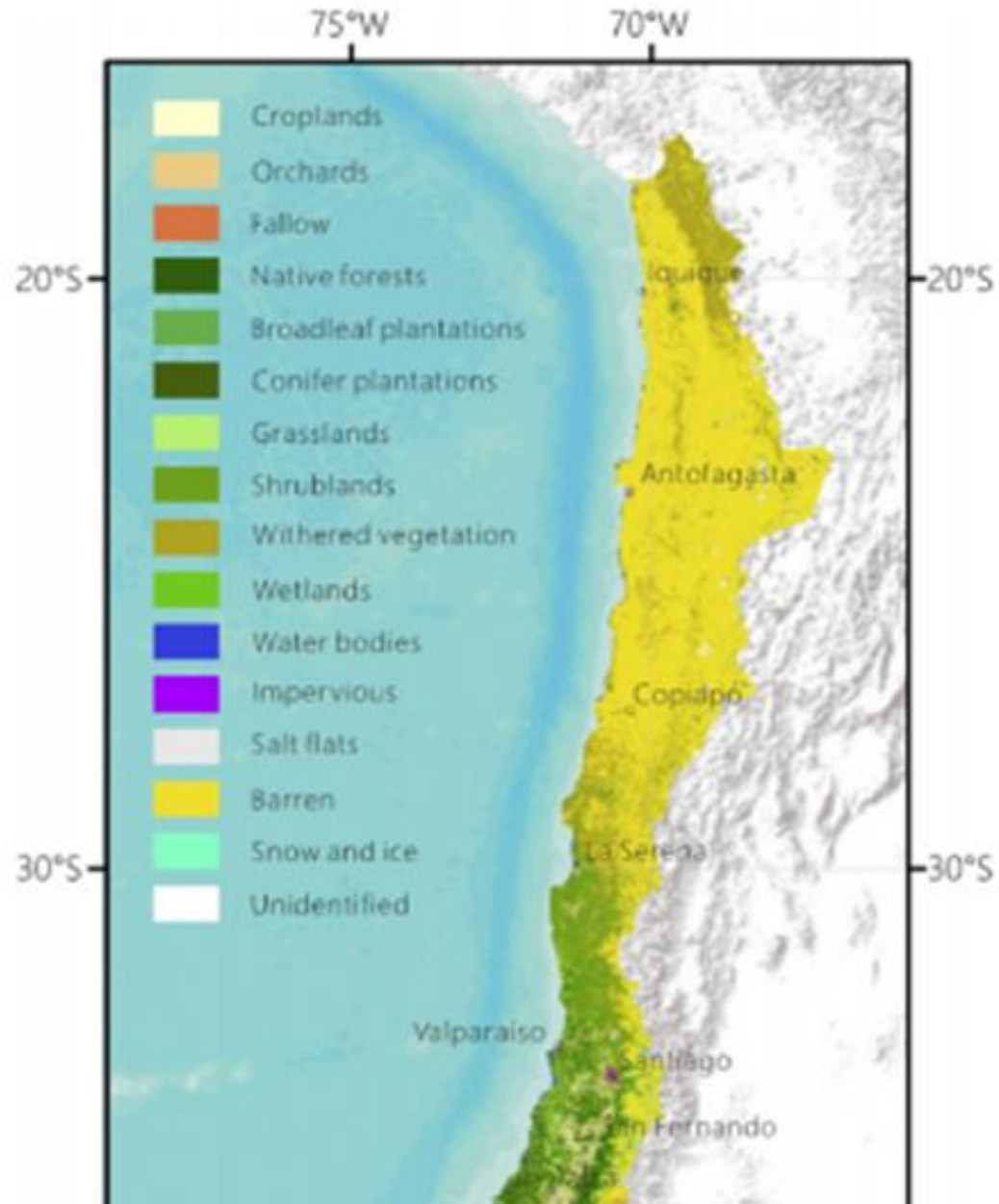
- **Incorporación de 65 cuencas.**
- Actualización de CR2-Met.
- **Lagos y glaciares.**
- Similitud cuenca-pixel y **regionalización de parámetros.**
- **estimaciones de balance hídrico.**
- Cambio climático.

Etapa 4

- **Incorporación de 17 cuencas.**
- Actualización de CR2-Met.
- **Glaciares y lagos.**
- Similitud cuenca-pixel y **regionalización de parámetros**
- **estimaciones de balance hídrico.**
- Cambio climático.

Consideraciones Básicas

Uso de Suelo (Zhao et al, 2016)

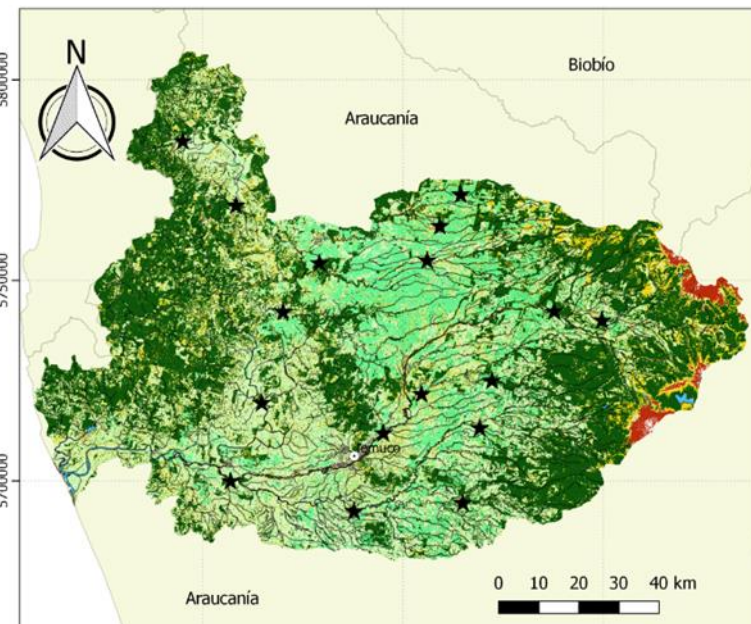
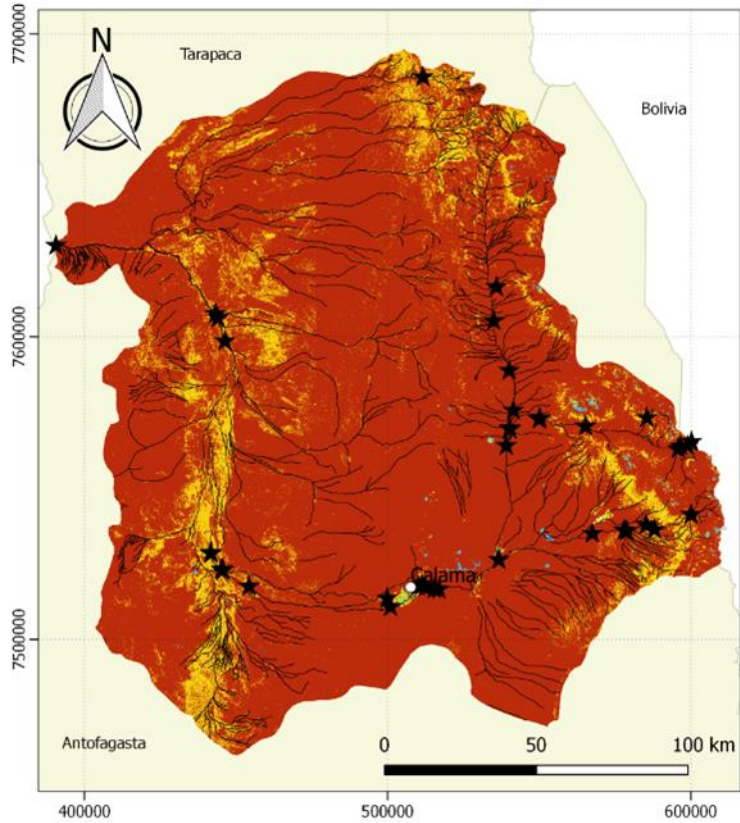


Resolución
30 m

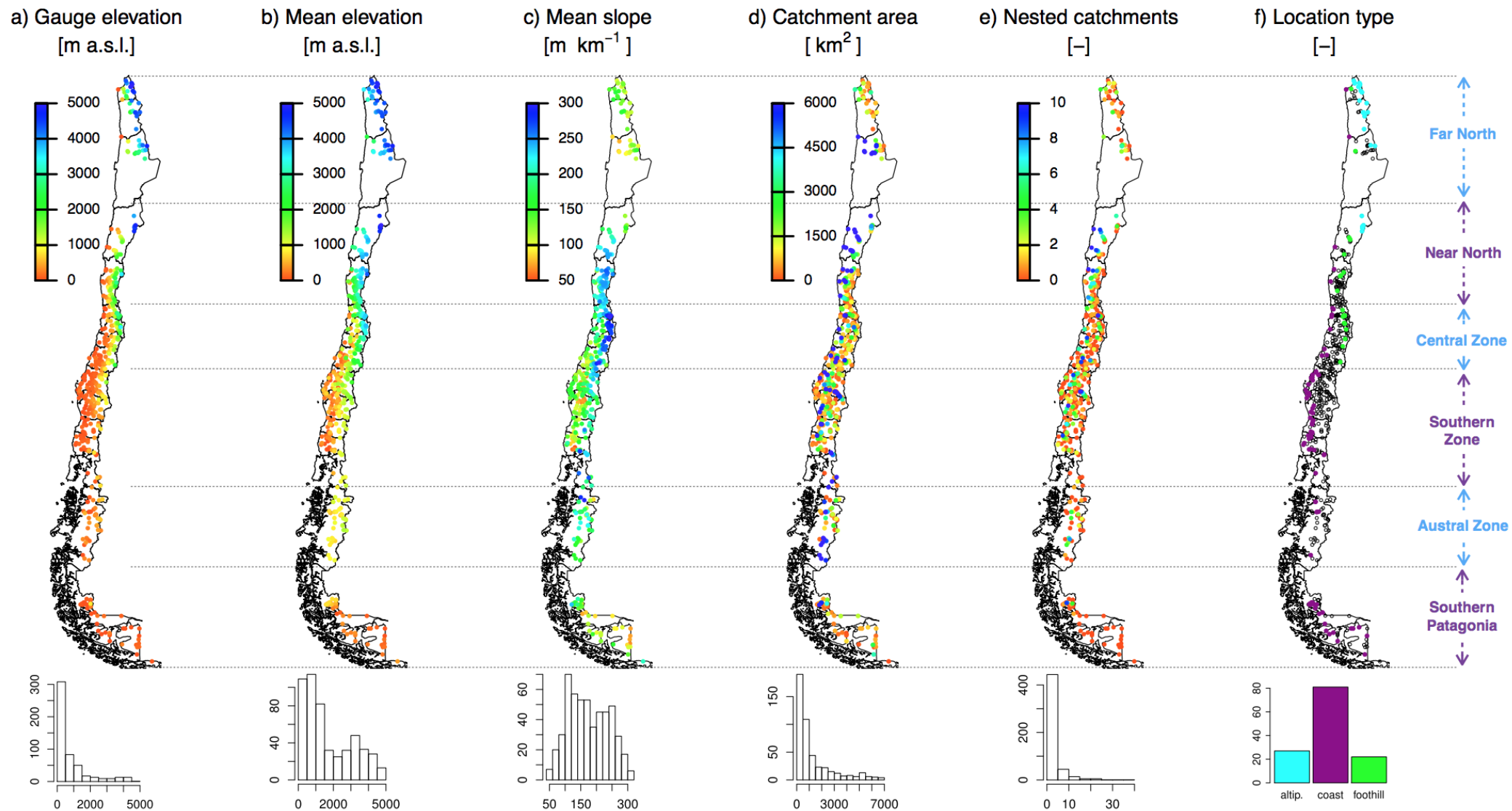
lobal.uc.cl

Etapa 1:

Cuencas piloto: Loa e Imperial



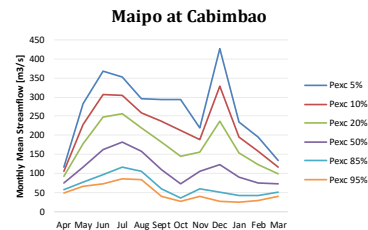
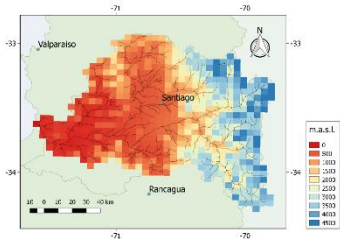
CAMELS-CL (Catchment Attributes and MEteorology for Large Sample studies - Chile dataset)



Enfoque Metodológico

1. Caracterización de cuenca

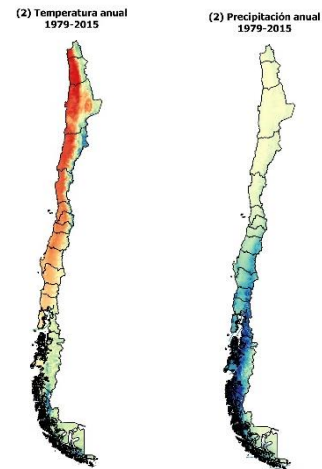
- Geomorfología
- Geología
- Cobertura vegetal
- Hidrología



2. Forzantes Meteorológicas

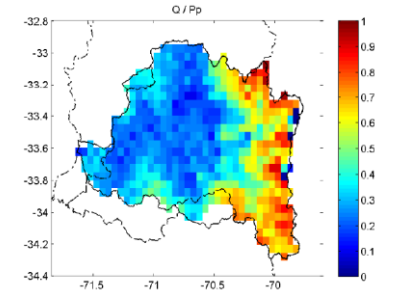
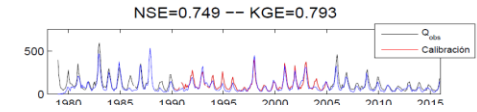
- Precipitación
- Temperaturas extremas
- Viento

$$P_{LOCAL} = \alpha + \beta P_{LS} + \gamma \vec{Q}_{LS} \cdot \nabla Z$$



3. Modelación hidrológica

- Representación de caudales en curvas de duración y de variación estacional
- Representación física de otros procesos.
- Consideran principales extracciones consuntivas superficiales.
- Similitud hidrológica para transferencia de parámetros.



4. Estimaciones de validación

- Cobertura nival
- Evapotranspiración
- Caudal
- Tasas de recarga

Enfoque Metodológico

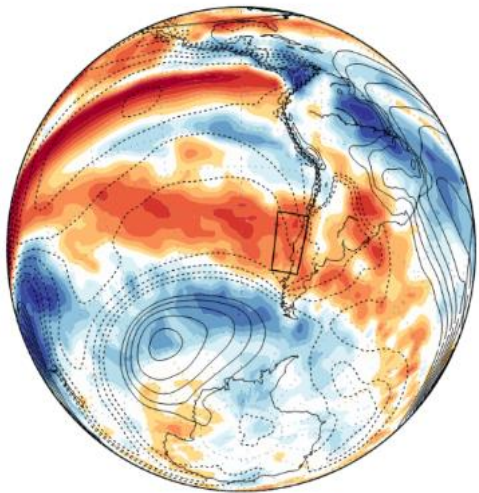
Selección de Modelos Climáticos

Representación de SAM y ENSO

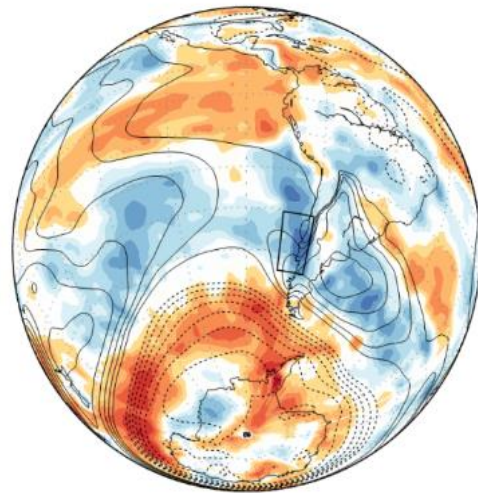
Sensibilidad climática

Cambios de temperatura y precipitación a escala regional (Análisis de delta)

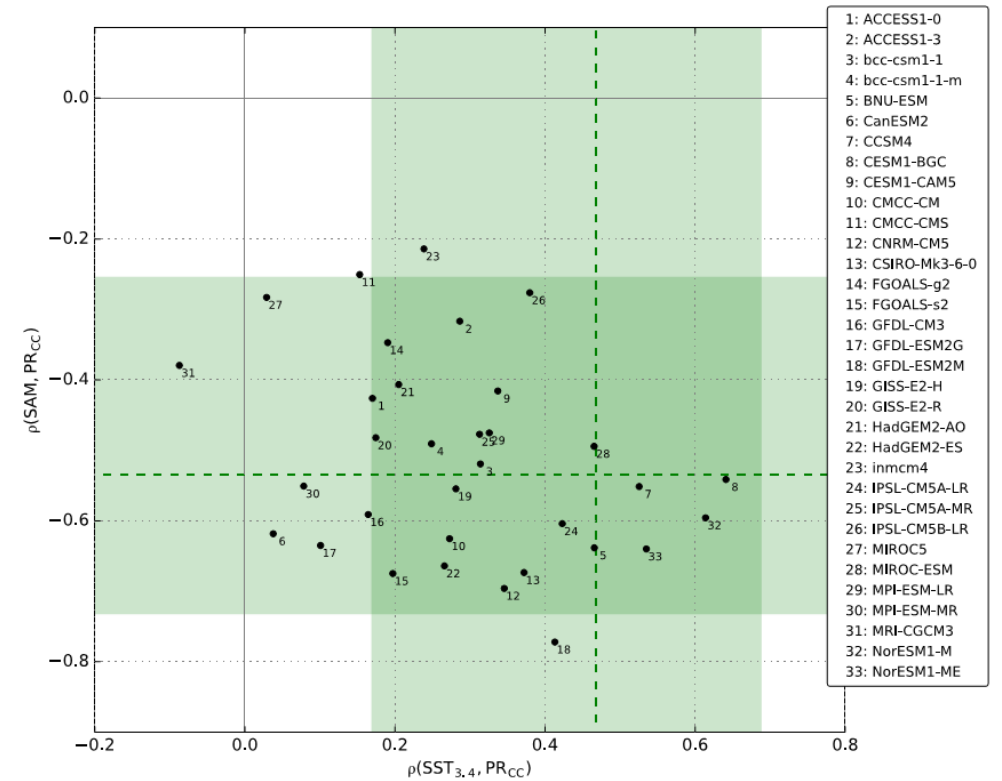
ENSO



SAM



Coefficiente de correlación



Influencia de ENSO (SST3.4) y el modo anular del hemisferio sur (SAM) en la precipitación anual (1979-2015) sobre distintas regiones del globo. Se muestra también la correlación entre ambos índices y la presión a nivel del mar (isolíneas a partir de ± 0.2). Datos: GPCP (Pr); ERA-Interim (SLP); ERSST (SST).

Enfoque Metodológico

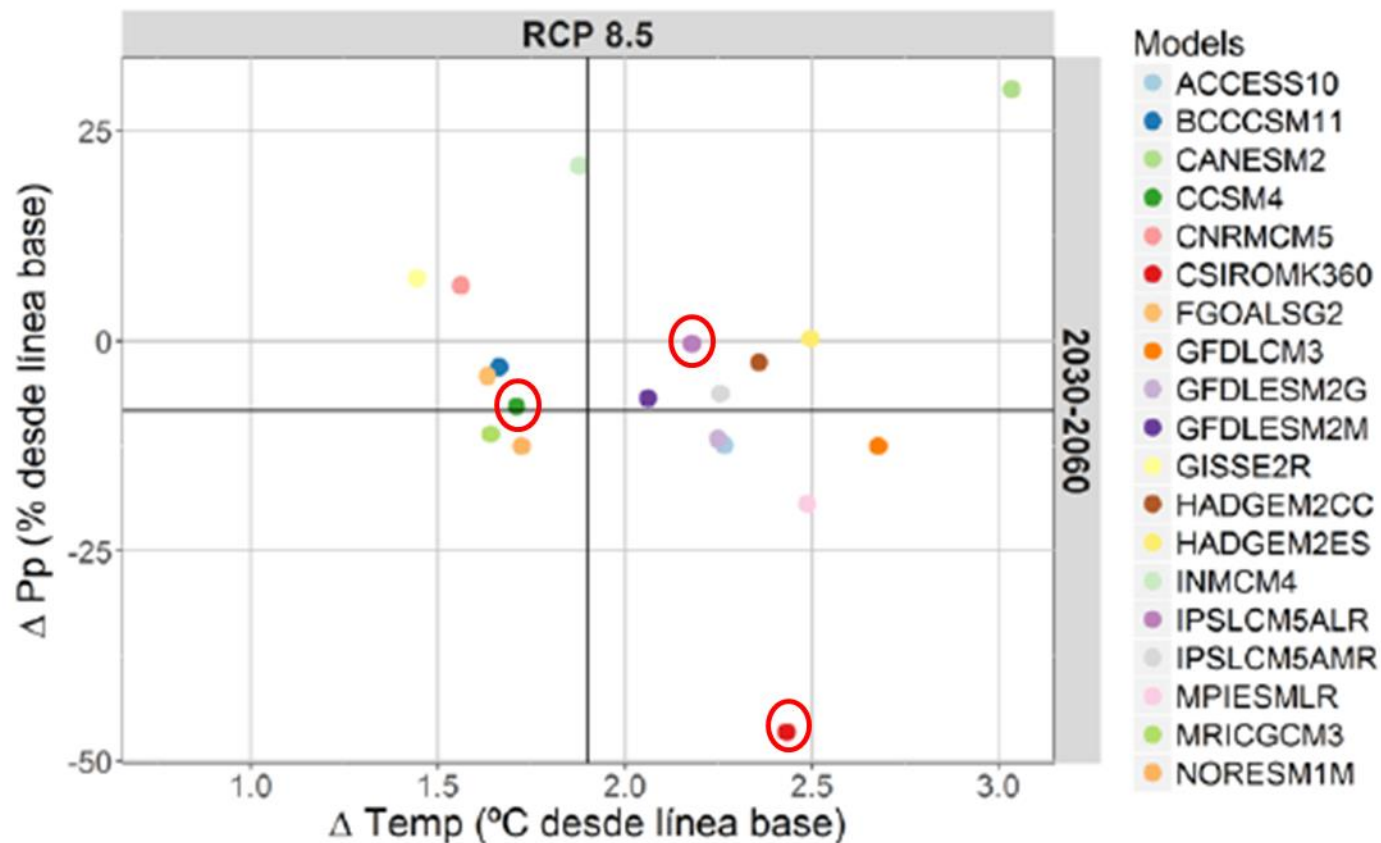


Figura 5.49: Deltas de precipitación (%) y temperatura (°C) para la cuenca del río Loa evaluada en 19 modelos climáticos contrastando el periodo actual (1985-2015) y futuro (2030-2060) para el escenario de cambio más severo (RCP 8.5).

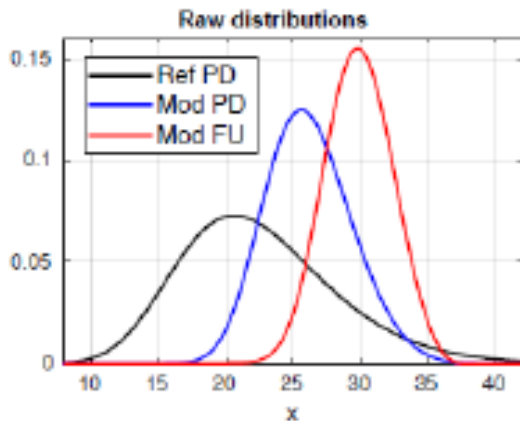
Selección de Modelos Climáticos

Río Loa

- Sensibilidad baja extrema CSIRO
- Sensibilidad baja moderada: CCSM4
- Sensibilidad alta moderada: MIROC
- Sensibilidad alta extrema: IPSL

Enfoque Metodológico

Con el fin de tener proyecciones de cambio hidrológico se plantea el uso de escalamiento estadístico considerando no estacionariedad de las series de precipitación y temperatura para los 4 GCM propuestos en Etapa 1



- Sensibilidad baja extrema CSIRO
- Sensibilidad baja moderada: CCSM4
- - Sensibilidad alta moderada: MIROC
- Sensibilidad alta extrema: IPSL

De las metodologías (Delta, QM y QDM) analizadas se selecciona QDM que preserva cambios absolutos (T) o relativos (P) en los cuantiles.

Modificaciones

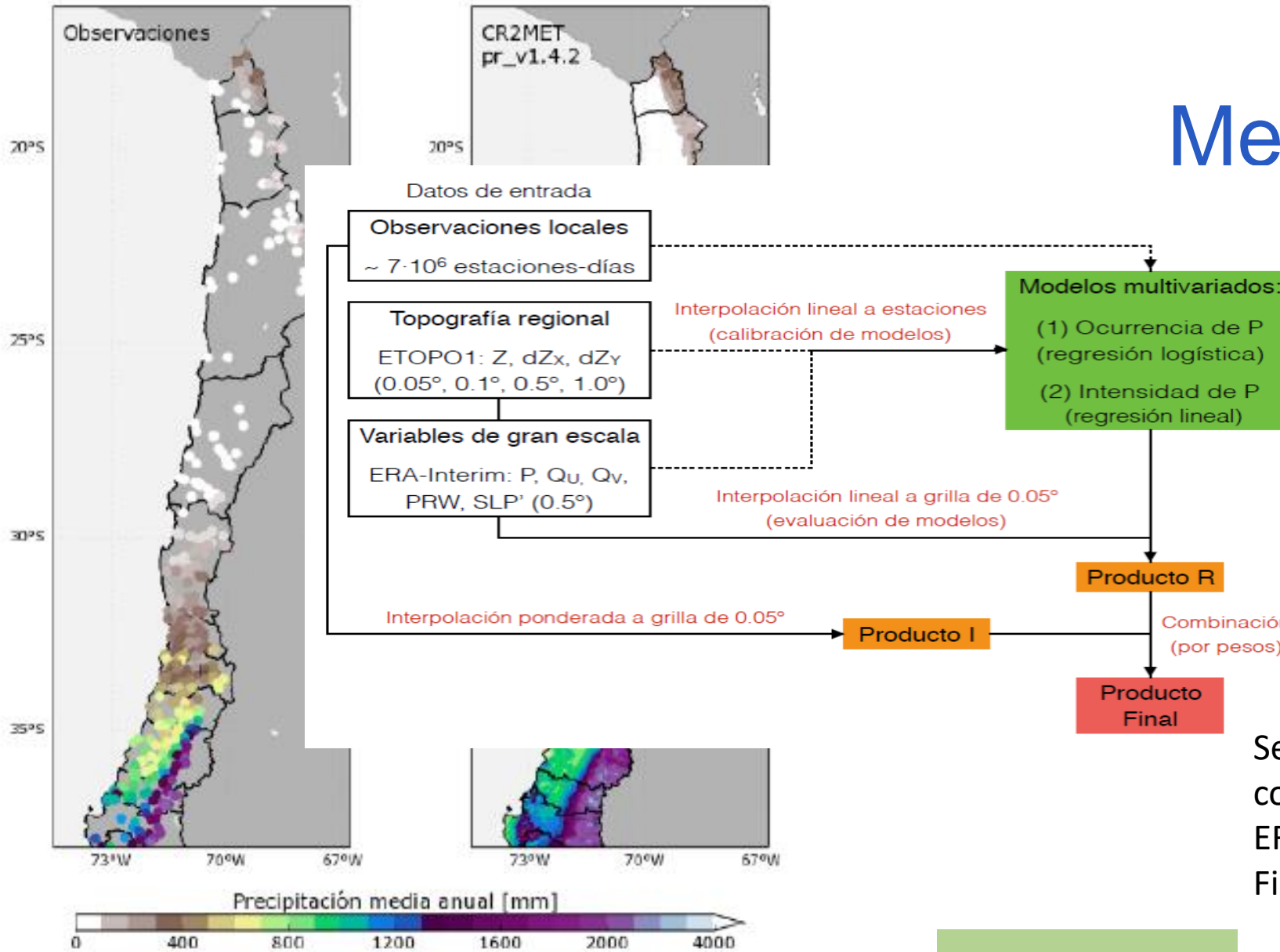
Enfoque Metodológico

Forzantes Meteorológicas

Modificaciones

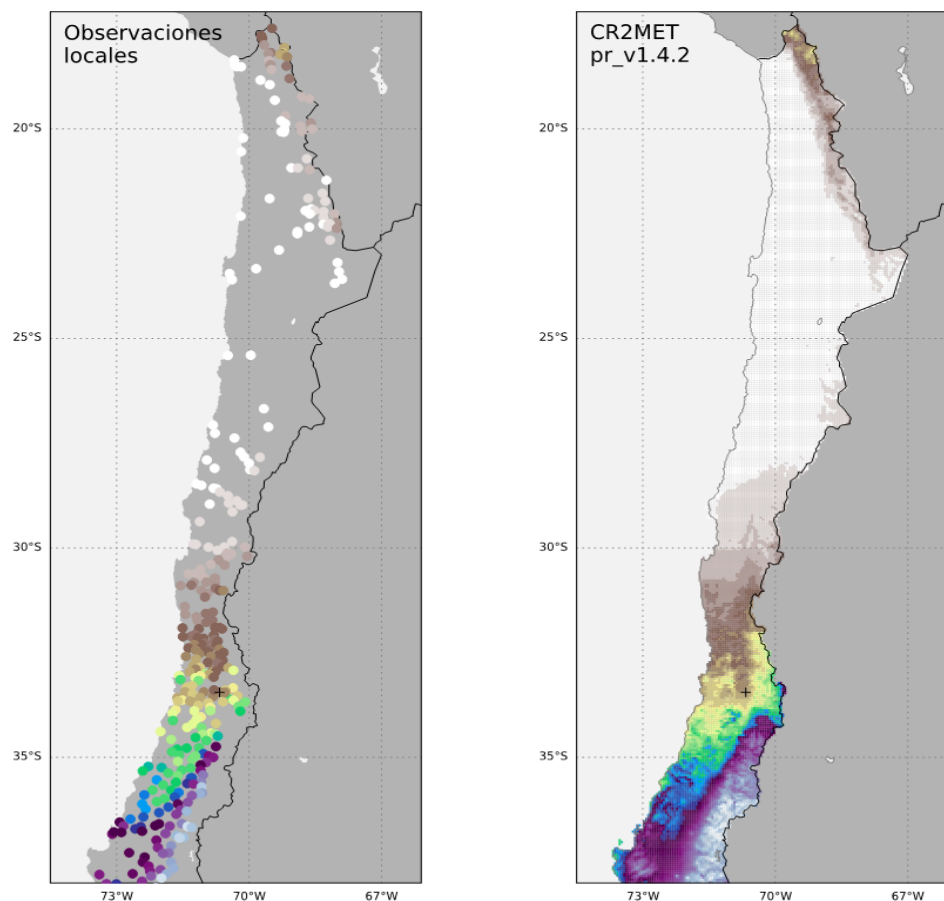
ERA4 res: ~80 km
ERA5 res: ~30 km

Se incorpora P de gran escala y P convectiva.
ERA blend
Filtro para ocurrencia de P

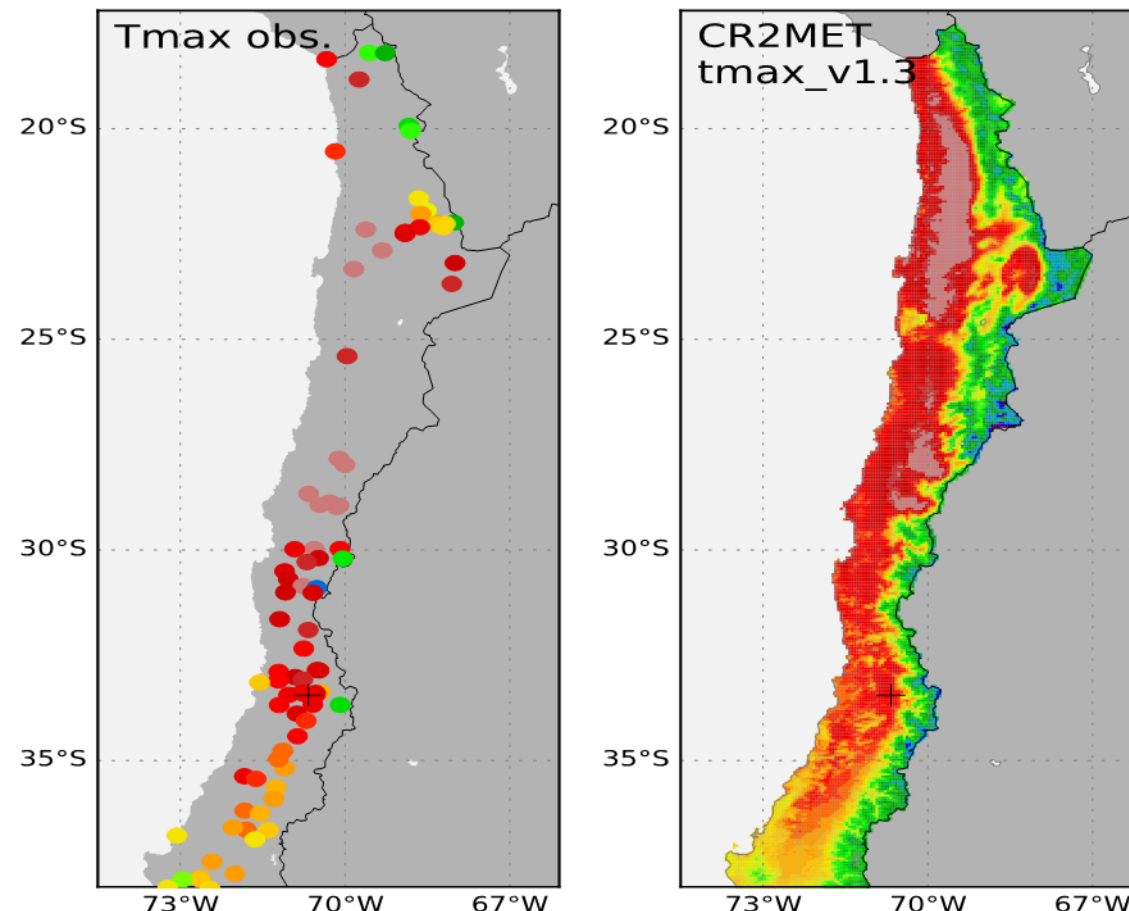
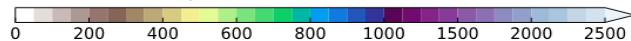


Forzantes meteorológicas distribuidas

Precipitaciones y Temperaturas 1985-2015



Precipitación anual media (mm)

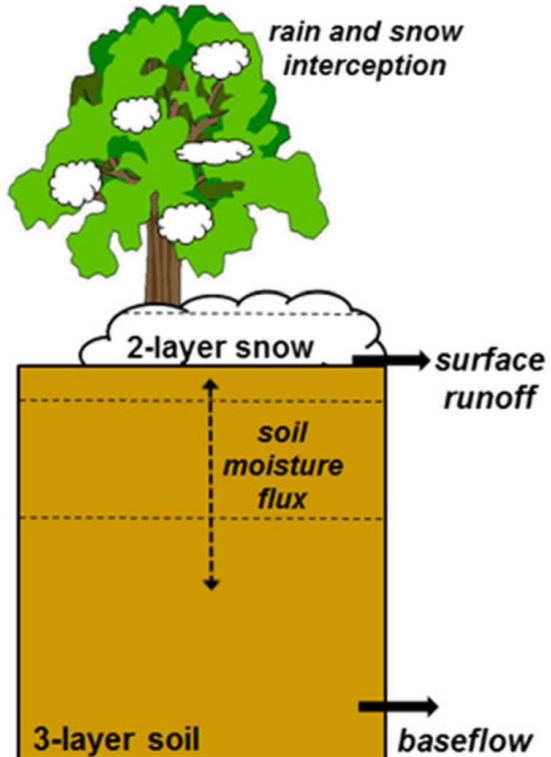


Temperatura mínima y máxima (media anual; °C)



Etapa2: Calibración de VIC: automatización de algoritmo

Mosaic representation of different vegetation coverages at each cell



Algoritmo de calibración

- Shuffled Complex Evolution (SCE-UA, Duan et al. 1992).
- Función objetivo: criterio de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Ajuste temporal

Ajuste en variabilidad

Ajuste en volumen

$$\alpha = \sigma_s / \sigma_o$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o$$

1 parámetro asociado a la temperatura a la cual puede llover/nevar

4 parámetros de nieve asociados al decaimiento del albedo y rugosidad de la nieve

4 parámetros asociados a la infiltración

2 parámetros asociados al paso de agua de un estrato de suelo a otro

1 parámetro asociado a la profundidad de cada estrato (3 en total)

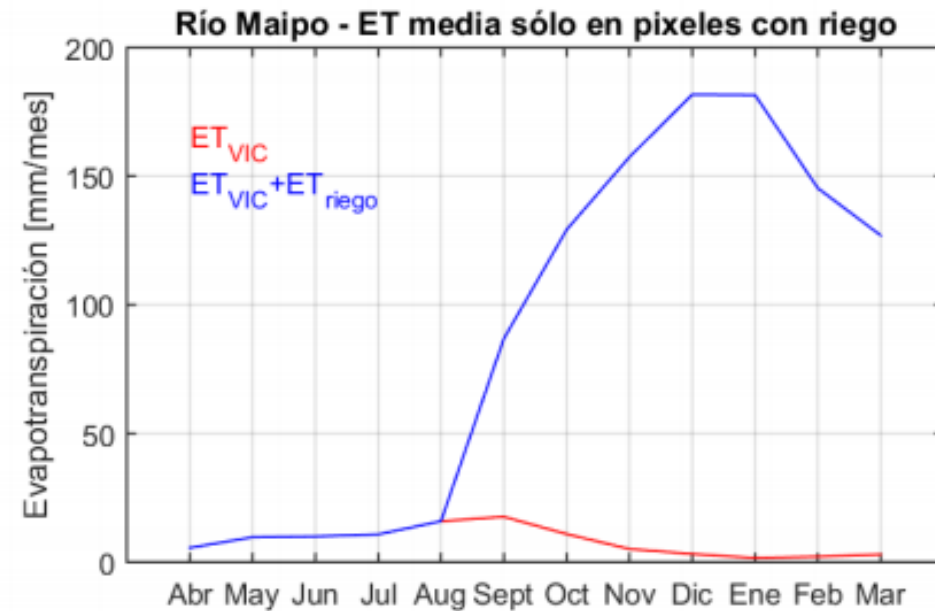
☐ Calibración

- Maximización de KGE y NSE para caudales medios mensuales (inicio) y diario.

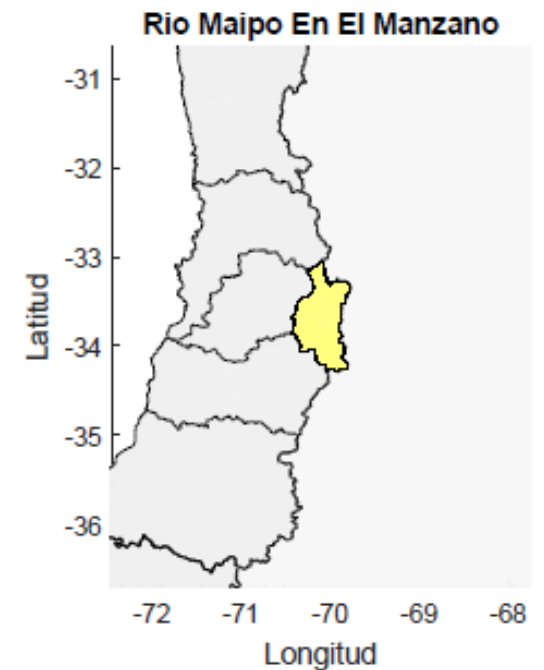
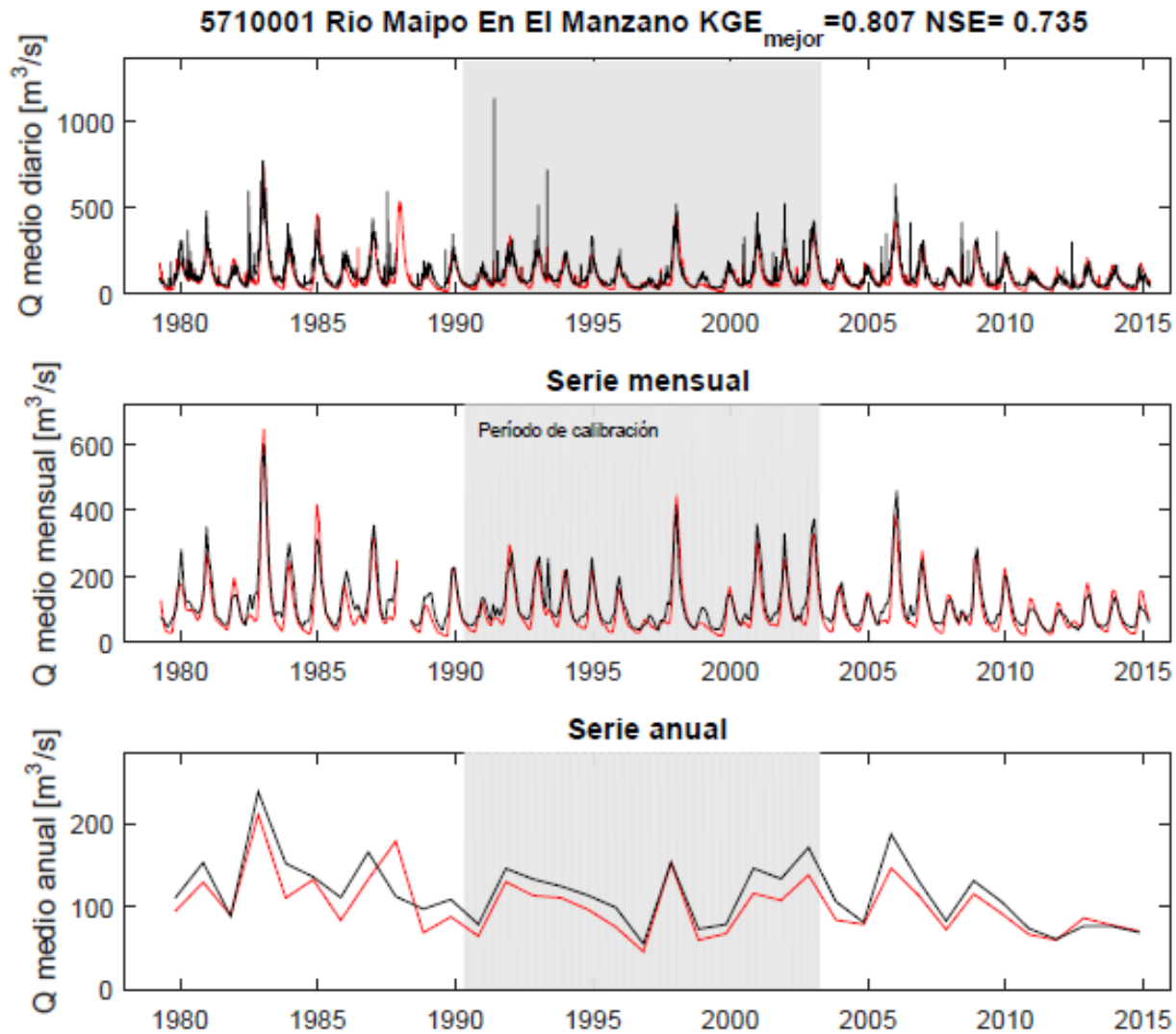
☐ Evaluación para cuencas con intervención

$$Q_{\text{modelado}} = Q_{\text{vic}} + Q_{\text{glaciar}} - D_{Et}$$

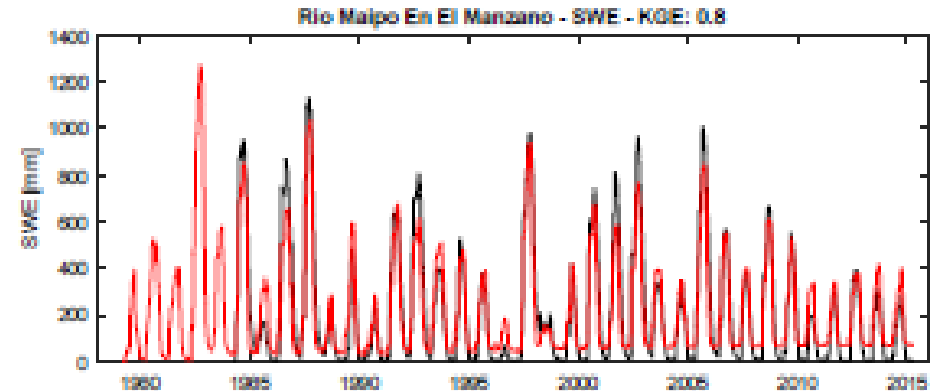
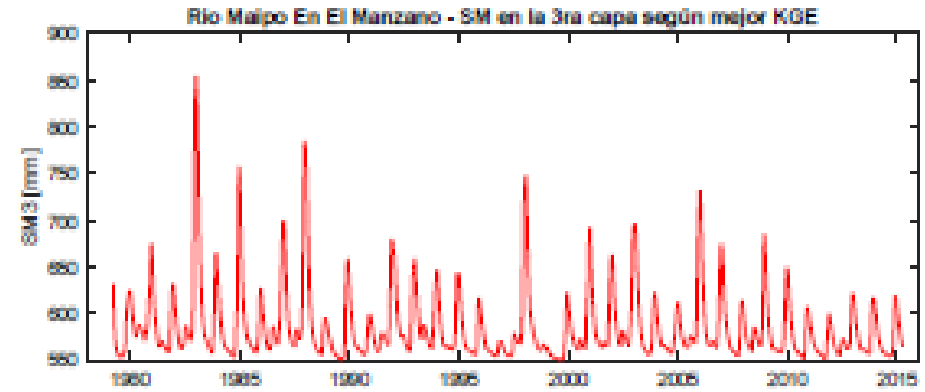
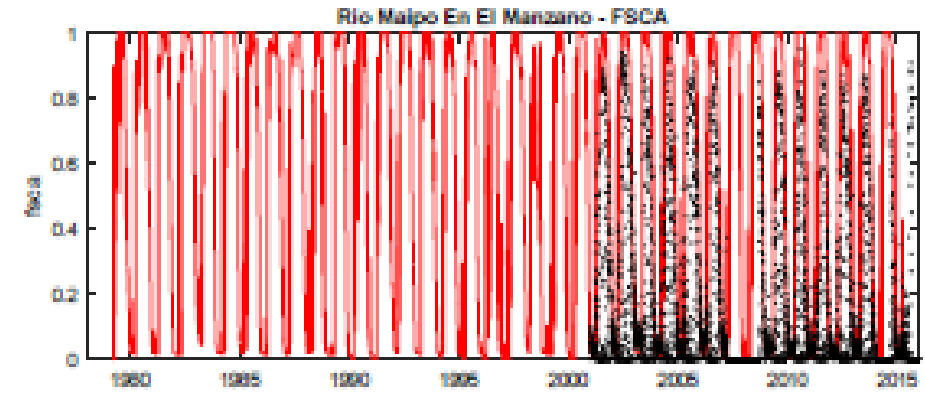
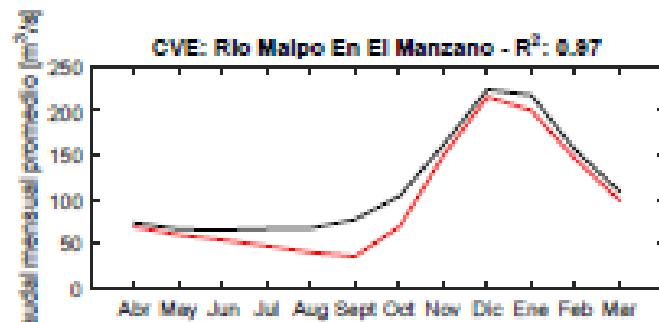
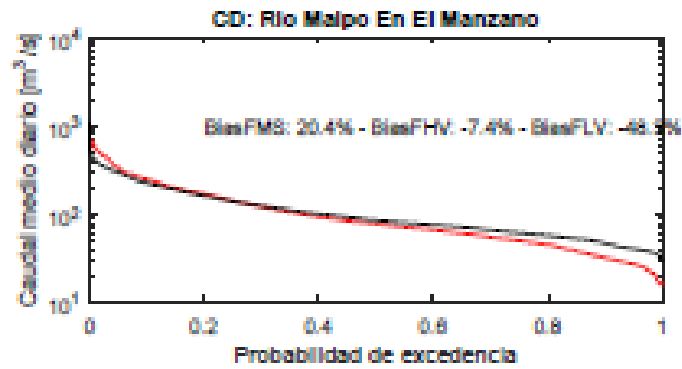
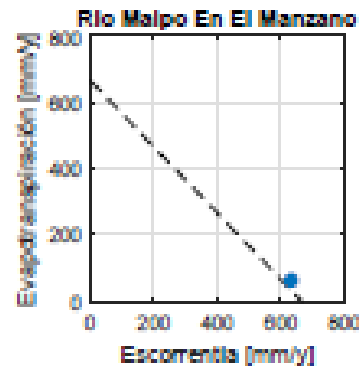
$$D_{Et} = Et_{\text{pot}} - D_{\text{nat}}$$



Calibración - Validación

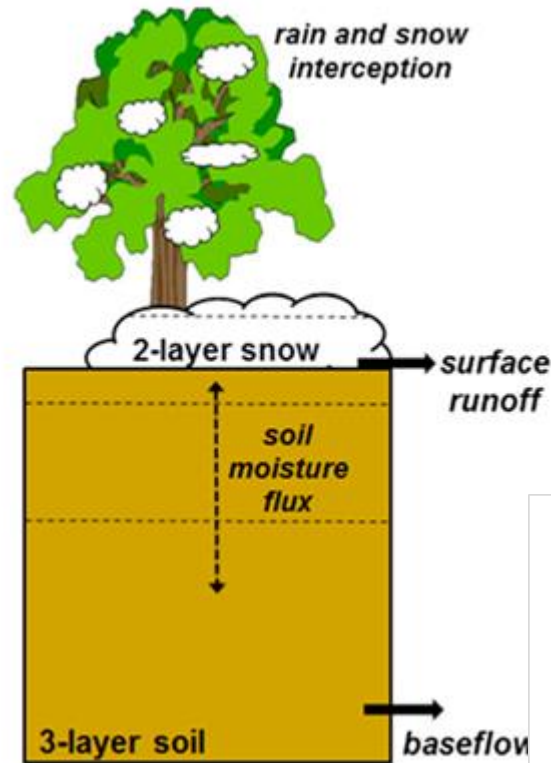
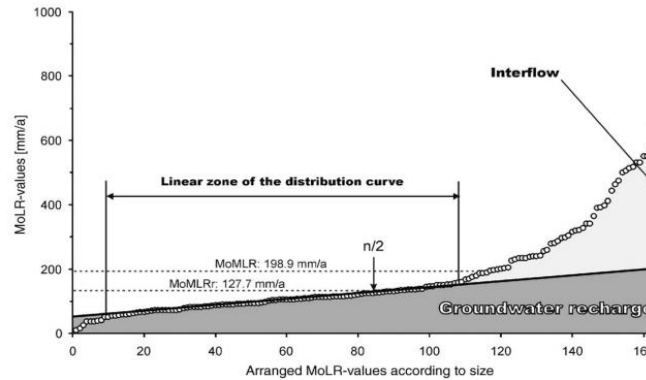


Calibración - Validación: fSCA, SM3, SWE



Calibración – Validación Estimación de Recargas

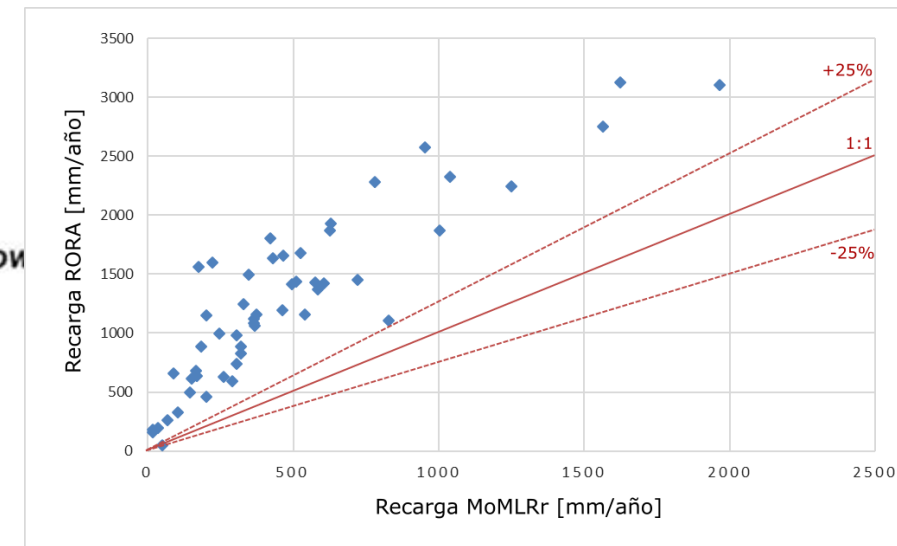
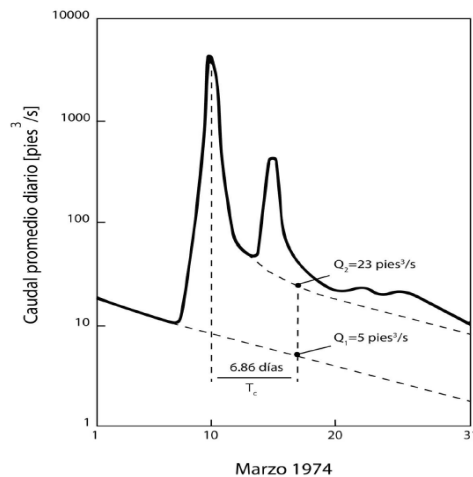
- MoMLR: Flujo mínimo mensual



- Estimación basada en VIC

$$\frac{dSM_3}{dt} = \text{Recarga} - \text{baseflow}$$

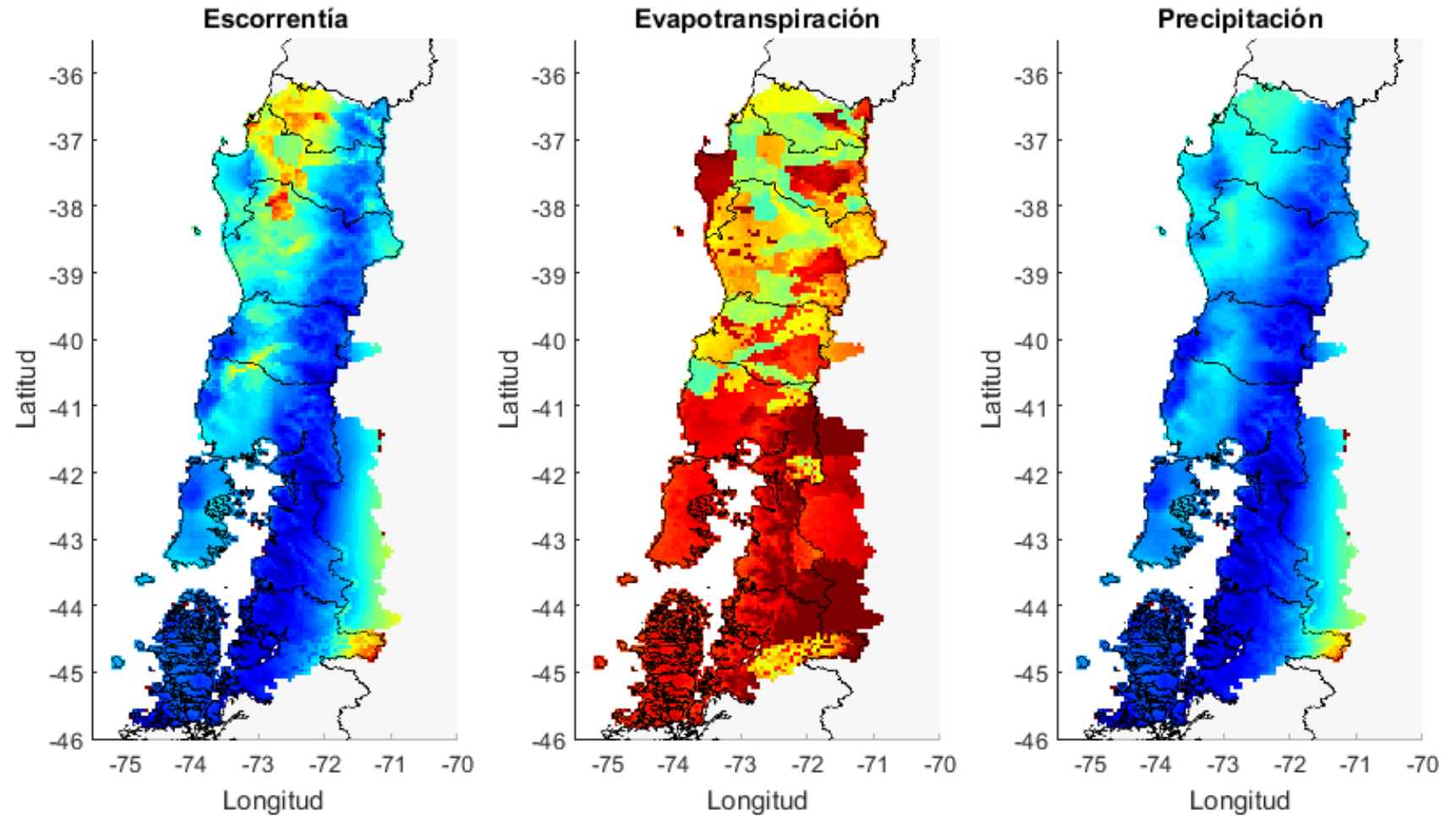
- RORA: Peaks durante período de lluvia



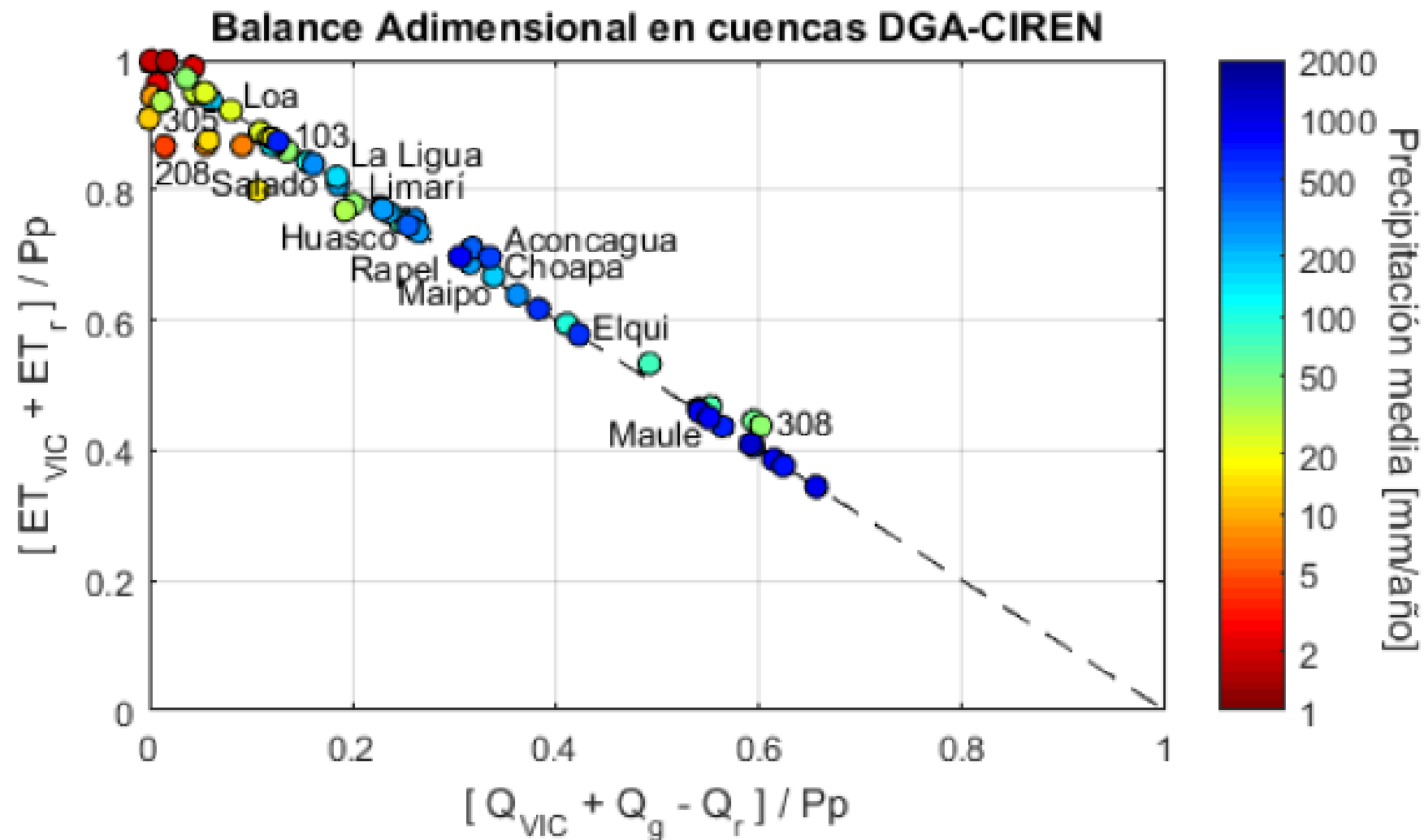
Resultados

Componentes de Balance Hídrico distribuidas

Período
1985-
2015



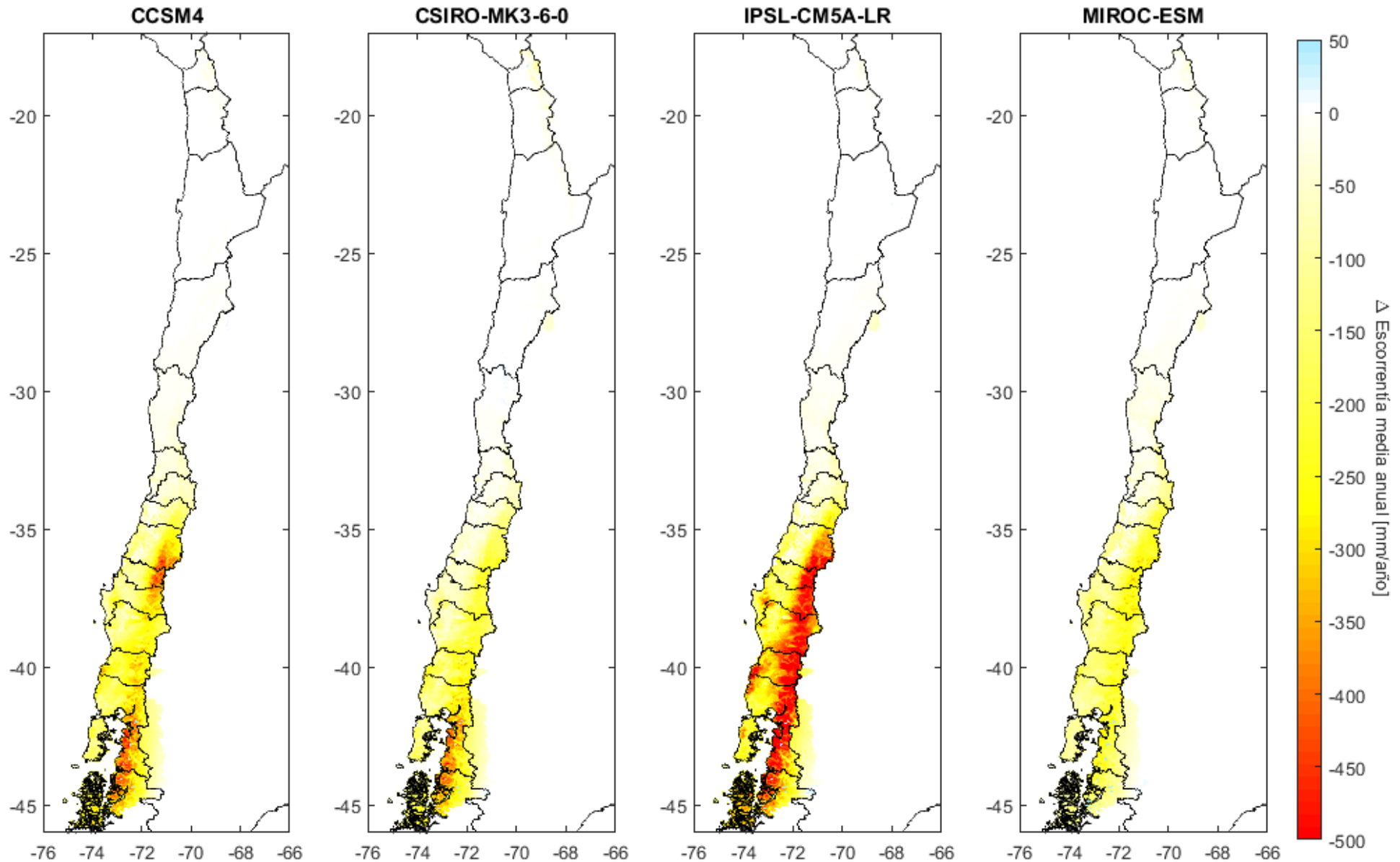
Balance Adimensional 1985-2015



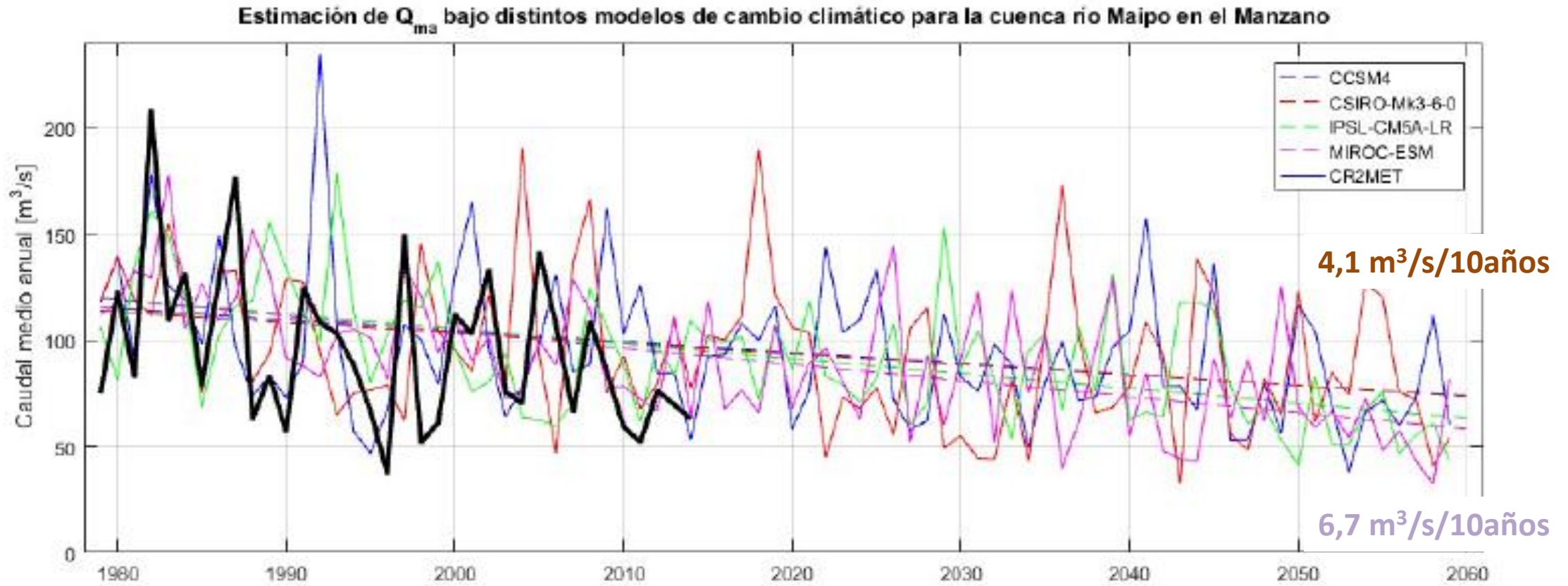
Variación futura de la Escorrentía

Período
2030-
2060

balance hídrico



Proyecciones de Q_{ma} en cuenca río Maipo en el Manzano

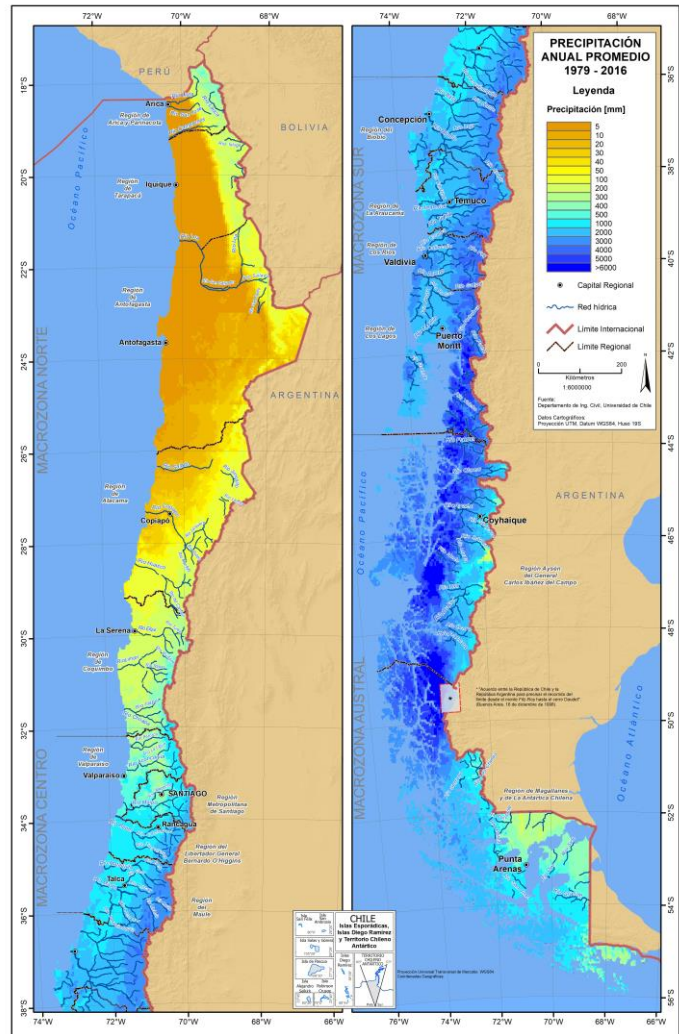
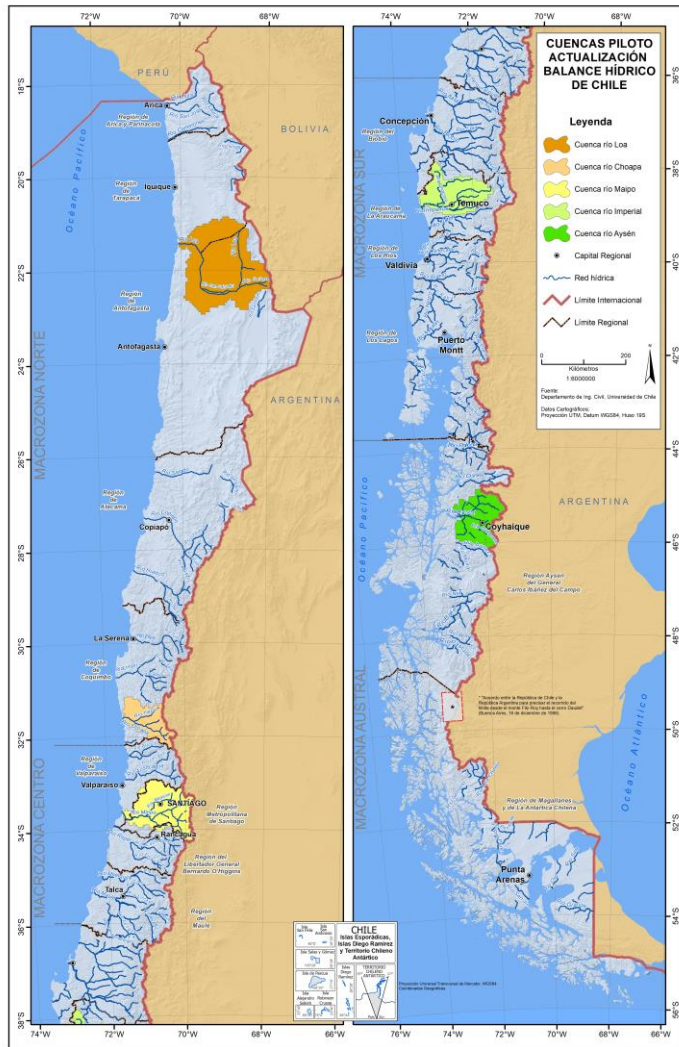


Síntesis

- Forzantes Meteorológicas distribuidas (grilla 5x5km) para período 1985 a 2060 para 4 modelos GCM
- Metodología de Calibración de Modelo Hidrológico
- Modelo VIC Calibrado en Cuencas en Régimen Natural en Cuencas de Macrozonas Norte a parte norte de la Austral
- Metodología de Regionalización de Parámetros
- Componentes del Balance Hídrico Distribuidas para período 1985 a 2060 para 4 modelos GCM












Uso de los resultados del nuevo Balance Hídrico de Chile

Resultados en formato SIG

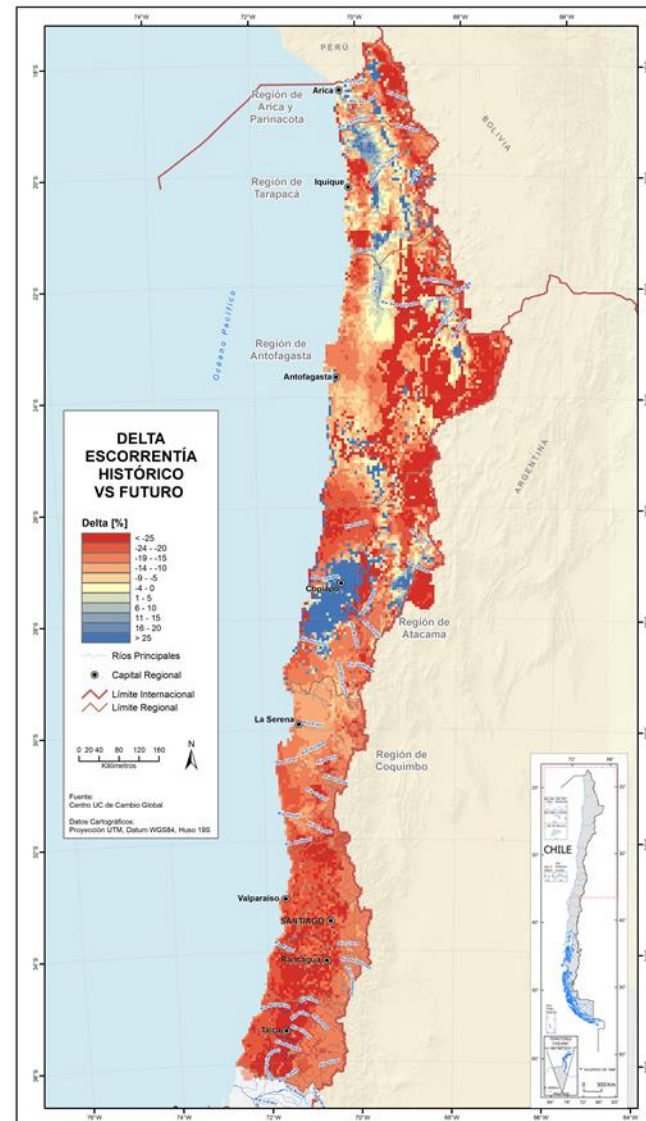
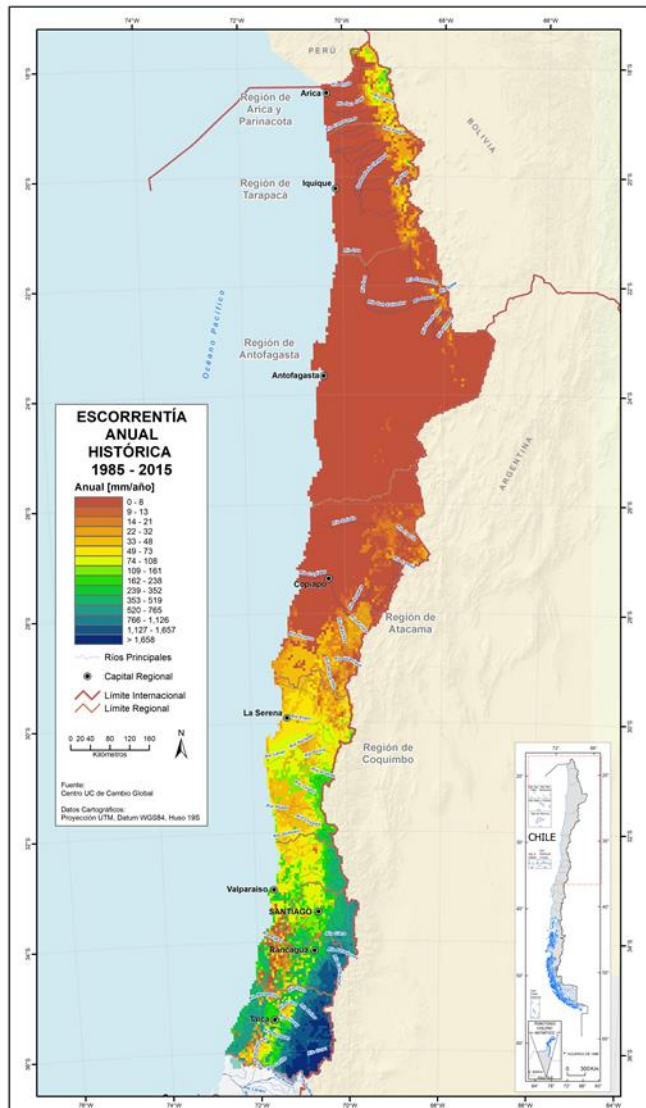


Información almacenada en un árbol de directorios

Toda la base de datos se encuentra organizada en un sistema de directorios que involucra a todas las variables resultantes del proyecto.

 1_Archivos_mxd	22-04-2019 9:44	Carpeta de archivos	
 2_Mapas	22-04-2019 10:13	Carpeta de archivos	
 3_Archivos_GBD	27-03-2019 20:24	Carpeta de archivos	
 4_Base_de_datos	19-08-2019 15:48	Carpeta de archivos	
 5_Herramientas_SIG	02-01-2019 12:55	Carpeta de archivos	
 6_Descripcion_y_Manuales	02-04-2019 9:15	Carpeta de archivos	
 7_Contenido carpetas_simplificado.xlsx	19-08-2019 17:06	Hoja de cálculo d...	17 KB
 8_Anexo_K (Anexo Cartográfico tipo 1).d...	19-08-2019 12:00	Documento de Mi...	150,100 KB
 8_Anexo_K (Anexo Cartográfico tipo 1).pdf	19-08-2019 12:03	Foxit Reader PDF ...	9,651 KB
 9_Album de planos_B4.docx	19-08-2019 12:40	Documento de Mi...	150,096 KB
 10_Leame.txt	22-04-2019 19:18	Documento de tex...	1 KB

Distintas cartas que permiten distinguir información histórica versus futura para varias variables



Comparación entre la escorrentía superficial histórica (1985-2015) y futura (2030-2060) en base al delta del promedio de los modelos (%)

Usabilidad del proyecto SIG

Los resultados del balance hídrico pueden ser consultados en una variedad de formatos según necesidad de la persona que hace la consulta: Excel, png, formatos de celdas/imagen tipo ráster, formatos vectoriales (shp), formato GeoDataBase de ESRI y formatos de almacenamiento multidimensional (NetCDF).

La información para distintos periodos de tiempo generada corresponde a:

- **Variables climáticas:** Temperaturas extremas, temperatura media, precipitaciones.
- **Variables modelo VIC:** Escorrentía, evapotranspiración, demanda de agua de cultivos, fracción del área cubierta por nieve, humedad de suelo, equivalente de agua de nieve.
- **Otras variables:** Glaciares, recarga.

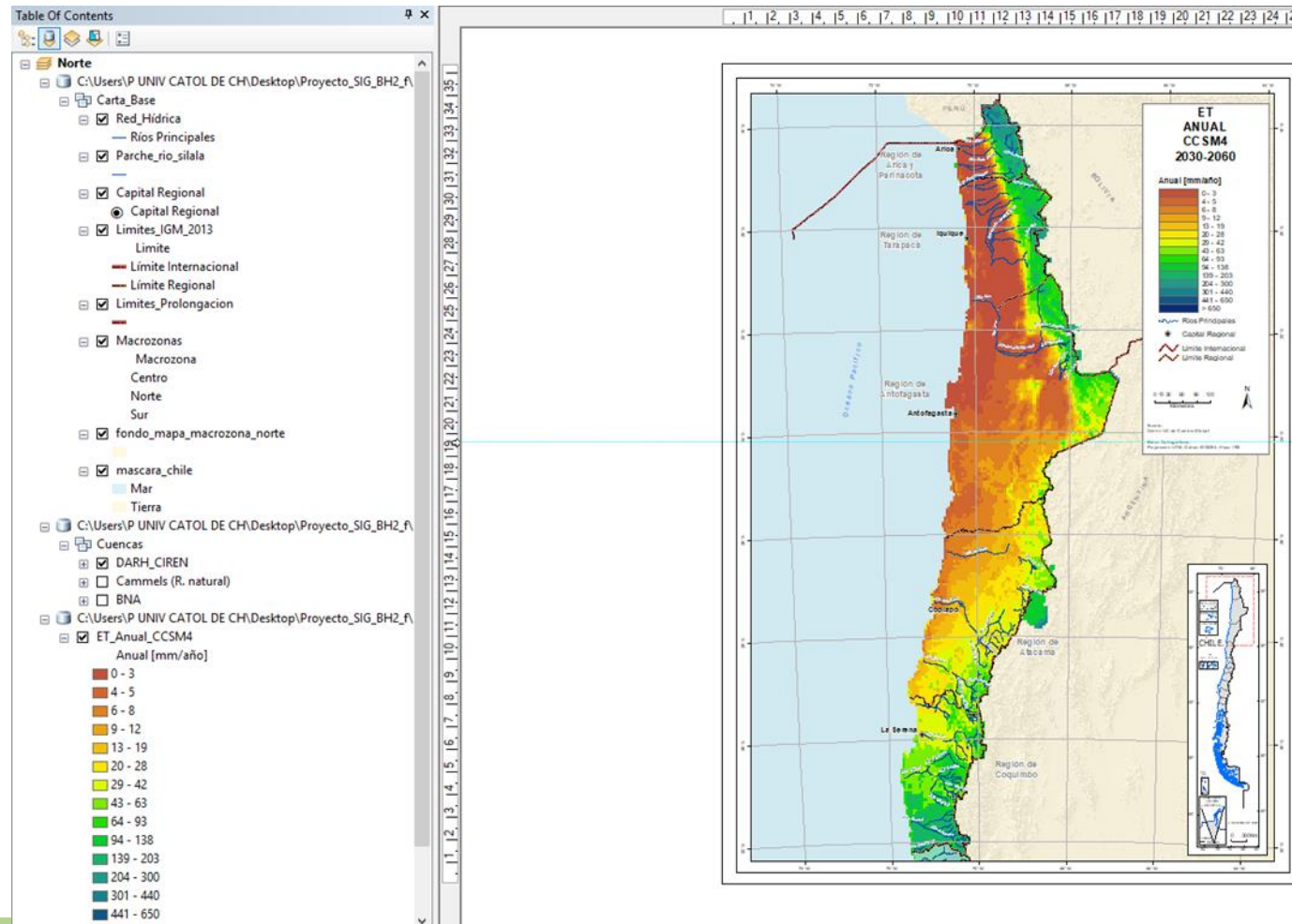
Usabilidad del proyecto SIG

Los distintos tipos de archivos a consultar dentro del SIG

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Lat	Lon	Region	Provincia	Comuna	Cuenca_B	Cuenca_D	Subcuenc	Subcuenc	Ene_85	Feb_85	Mar_85	Abr_85	May_85	Jun_85
2	-17.525	-69.475	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	56.62	153.03	29.22	1.23	0	0.61
3	-17.575	-69.575	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	59.27	191.11	44.26	6.26	0	0.75
4	-17.575	-69.525	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	62.18	162.12	32.58	0.91	0	0.37
5	-17.575	-69.475	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	65.1	161.16	33.32	0.55	0	0.16
6	-17.625	-69.625	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	50.63	199.31	56.8	14.27	0	1.06
7	-17.625	-69.575	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	53.18	183.39	43.38	7.04	0	0.73
8	-17.625	-69.525	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	63.75	168.87	34.76	1.36	0	0.37
9	-17.625	-69.475	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Uchusum	64.02	160.54	32.76	0.64	0	0.2
10	-17.625	-69.425	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	55.8	148.05	28.52	1.11	0	0.38
11	-17.675	-69.825	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Río Lluta	Río Lluta	Río Lluta Altr	Río Lluta	59.5	290.06	95.84	26.62	0.51	1.19
12	-17.675	-69.775	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Río Lluta	Río Lluta	Río Lluta Altr	Río Lluta	54.35	284.42	83.17	26.07	0.89	1.42
13	-17.675	-69.725	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Río Lluta	Río Lluta	Río Lluta Altr	Río Lluta	42.41	227.1	58.51	14.64	0.03	0.74
14	-17.675	-69.675	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Río Lluta	Río Lluta	Río Lluta Altr	Río Lluta	44.19	215.07	58.91	15.3	0	0.78
15	-17.675	-69.625	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Río Lluta	Río Uchusum	Río Lluta Altr	Río Putani	53.29	220.49	65.76	19.46	0.55	1.01
16	-17.675	-69.575	Región de Ar	Parinacota	General Lagc	Altiplanicas	Río Uchusum	Entre Limite	Río Putani	51.4	198.71	54	13.12	0	0.82

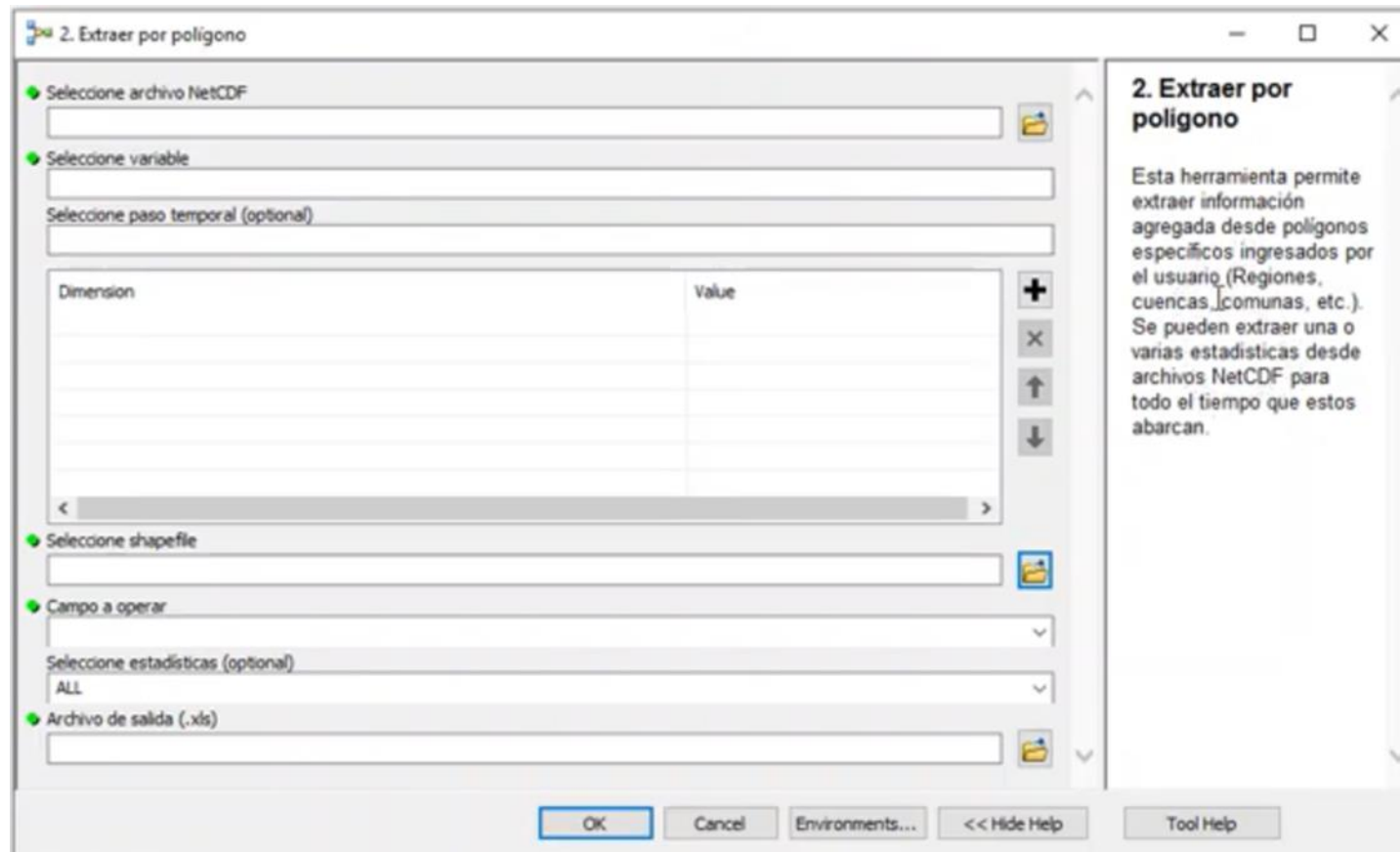
Usabilidad del proyecto SIG

Los distintos tipos de archivos a consultar dentro del SIG



Usabilidad del proyecto SIG

Ejemplo: Existen herramientas SIG diseñadas para la consulta de archivos en formato netcdf, compatibles con el software ArcGIS.



Herramienta de extraer por polígono: Permite obtener estadísticas de zonas específicas (cuencas, regiones, comunas, etc.), especificadas por el usuario.

El resultado es una planilla Excel con los resultados correspondientes

Usabilidad del proyecto SIG

Ejemplo: Existen herramientas SIG diseñadas para la consulta de archivos en formato netcdf, compatibles con el software ArcGIS.

	A	B	C	D	E	F	G
1	OBJECTID	NOM_CUEN	ZONE_CODE	COUNT	AREA	MEAN	
2	1	Rio Lluta	1	116	0.29	0.828391282	
3	2	Rio San Jose	2	107	0.2675	6.044156786	
4	3	Pampa del Tamarugal	3	597	1.4925	5.802071096	
5	4	Rio Loa	4	1156	2.89	3.774201752	
6	5	Rio Copiapo	5	686	1.715	5.785966468	
7	6	Rio Huasco	6	365	0.9125	6.836965141	
8	7	Rio Elqui	7	370	0.925	5.687659005	
9	8	Rio Limari	8	442	1.105	7.45245814	
10	9	Rio Choapa	9	288	0.72	6.517859357	
11	10	Rio Petorca	10	76	0.19	6.702632317	
12	11	Rio Ligua	11	75	0.1875	7.035551068	
13	12	Rio Aconcagua	12	286	0.715	5.264863255	
14	13	Rio Maipo	13	598	1.495	5.625863995	
15	14	Rio Rapel	14	543	1.3575	6.003334353	
16	15	Rio Mataquito	15	250	0.625	5.603991336	
17	16	Rio Maule	16	840	2.1	5.900985985	
18							
19							
20							

Herramienta de extraer por polígono: Permite obtener estadísticas de zonas específicas (cuencas, regiones, comunas, etc., especificadas por el usuario.

El resultado es una planilla Excel con los resultados correspondientes

Usabilidad del proyecto SIG

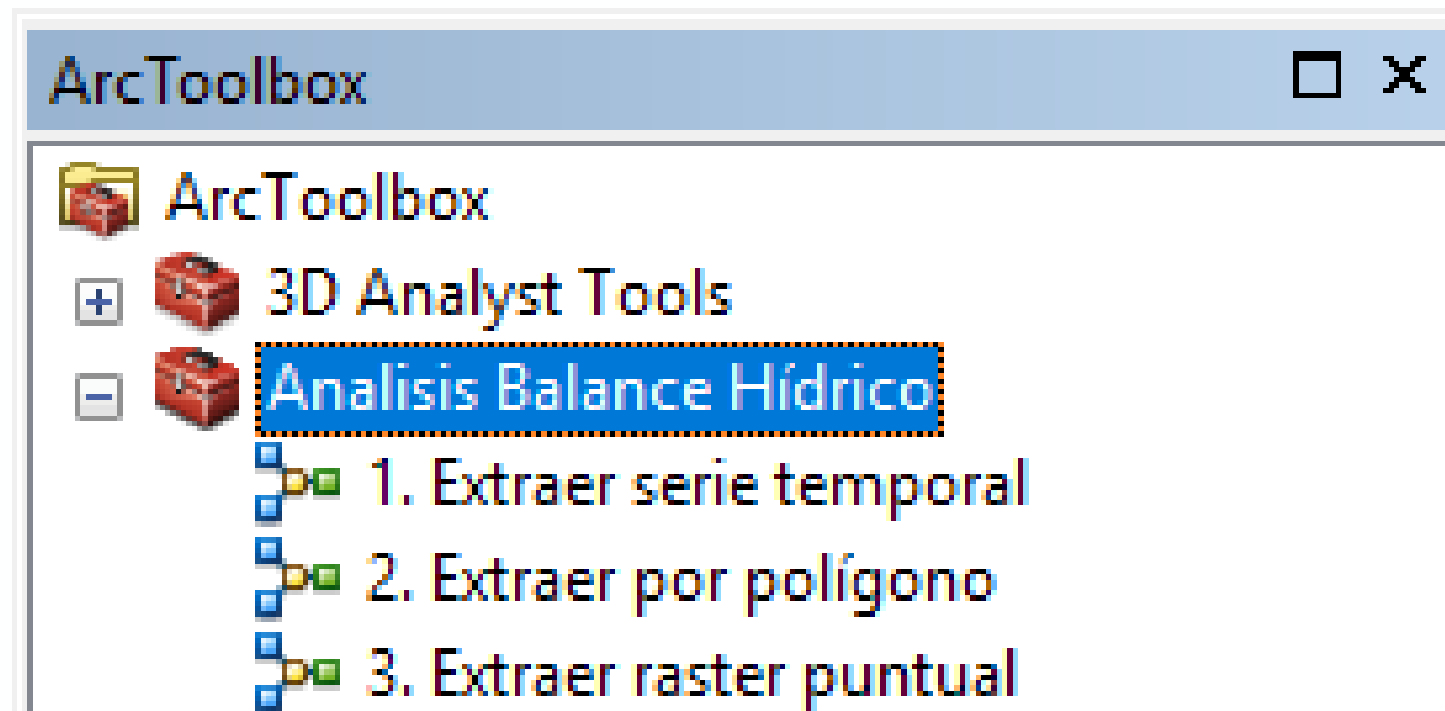
Otras de la herramientas disponibles para la manipulación de archivos netCDF.

- **Extraer serie temporal:** Para coordenadas específicas se extraen las series de tiempo actuales o futuras de la variable respectiva.
- **Exportar ráster:** Para una fecha particular se extrae un archivo en formato ráster de la variable que corresponda.

Usabilidad del proyecto SIG

Ejemplo: Extracción de serie temporal para un punto en específico.

1) En el software ArcGIS, se carga la caja de herramientas a utilizar

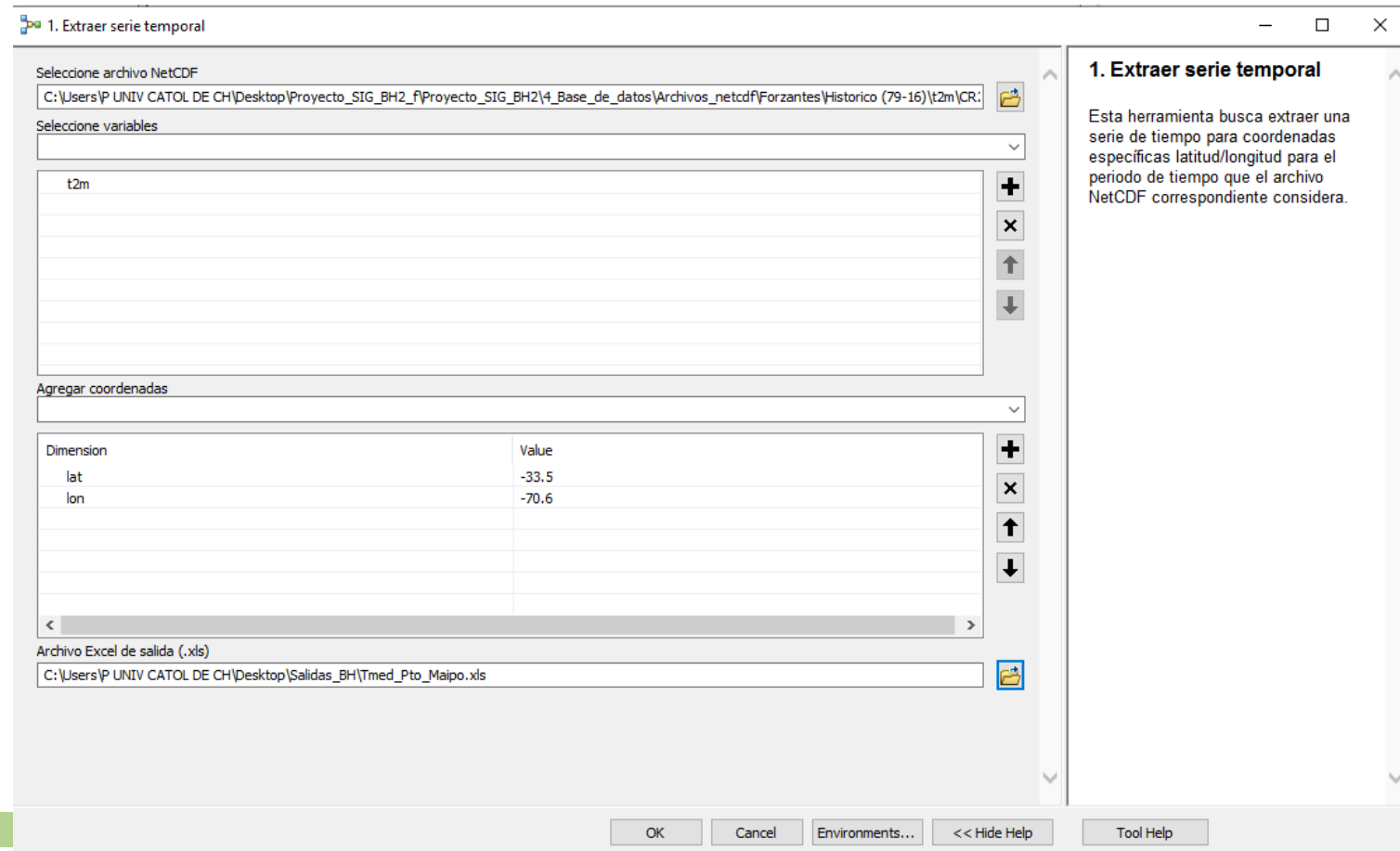


Usabilidad del proyecto SIG

Ejemplo: Extracción de serie temporal para un punto en específico.

2) Se carga la herramienta específica a utilizar y se completa con los parámetros correspondientes.

En este caso se extrae una serie de tiempo para un punto en específico en la cuenca del rio Maipo para la variable precipitación.

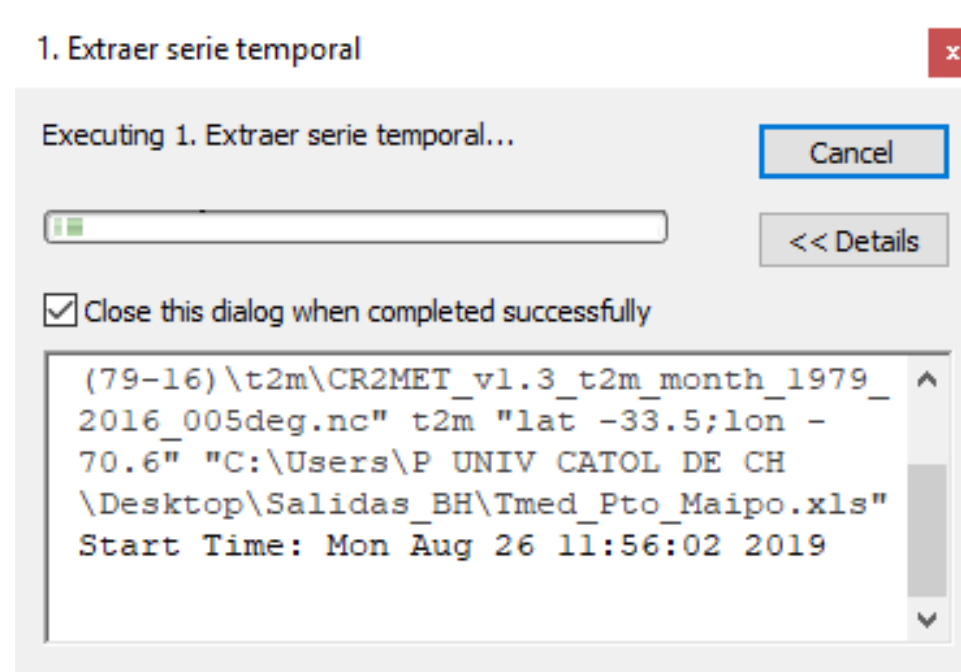


Usabilidad del proyecto SIG

Ejemplo: Extracción de serie temporal para un punto en específico.

3) La herramienta se ejecuta y se ejecutan los procesos sobre el archivo NetCDF que devuelve el resultado.

El proceso de ejecuta de forma rápida para extraer valores en la serie mensual.



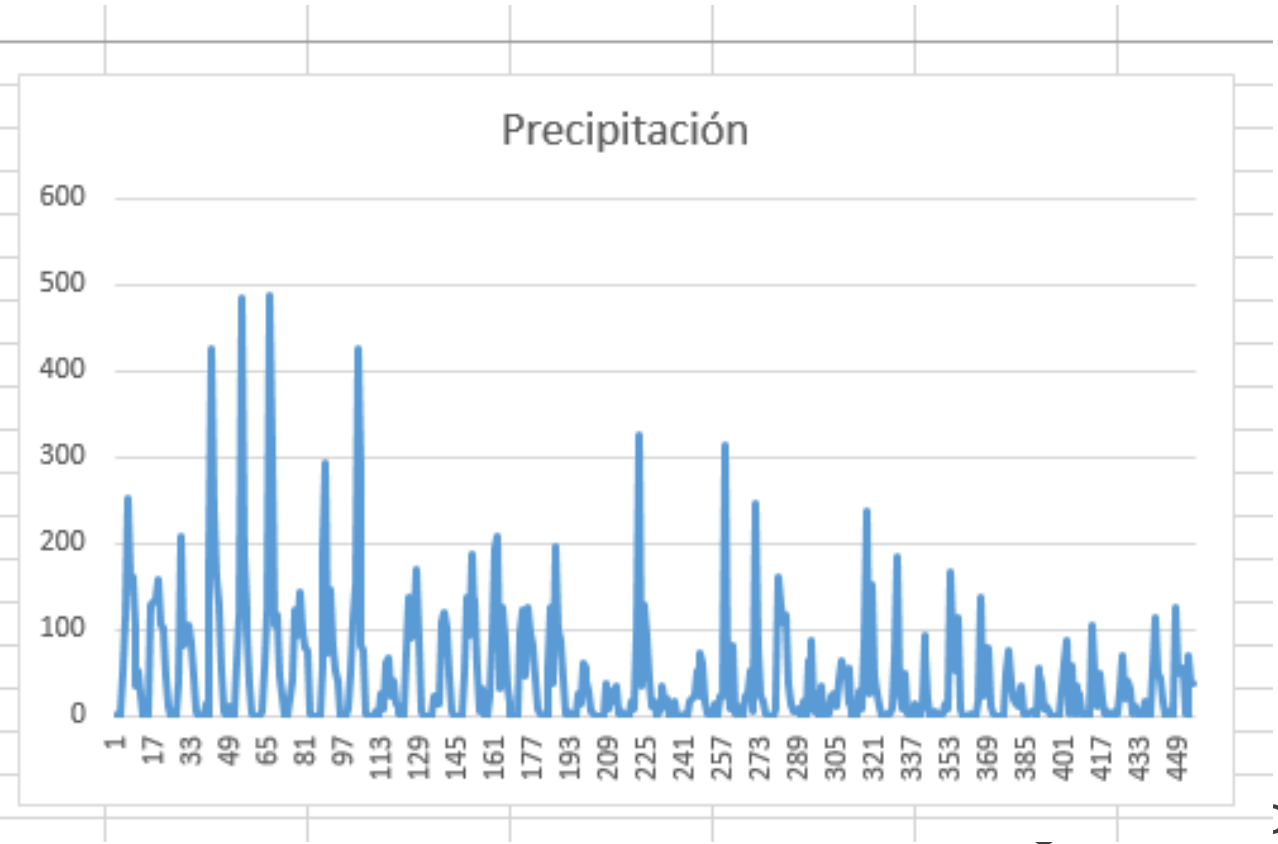
Usabilidad del proyecto SIG

Ejemplo: Extracción de serie temporal para un punto en específico.

4) El resultado queda en formato Excel en el directorio seleccionado por el usuario.

El resultado correspondiente, se puede graficar por ejemplo.

time	pr
1979-01-14 10:29	0.150000006
1979-02-13 20:58	2.200000048
1979-03-16 7:27	0
1979-04-15 17:56	50.459999908
1979-05-16 4:25	113.9499969
1979-06-15 14:54	251.3800049
1979-07-16 1:23	158.8699951
1979-08-15 11:52	160.7400055
1979-09-14 22:21	101.8399963
1979-10-15 8:50	35.38000107
1979-11-14 19:19	53.65000153
1979-12-15 5:48	26.27000046
1980-01-14 16:17	0.529999971
1980-02-14 2:46	15.09000015
1980-03-15 13:15	0.029999999
1980-04-14 23:45	129.5700073
1980-05-15 10:14	131.8300018
1980-06-14 20:43	135.3699951
1980-07-15 7:12	150.3500061





Centro UC
Cambio Global

10 AÑOS

Material Anexo

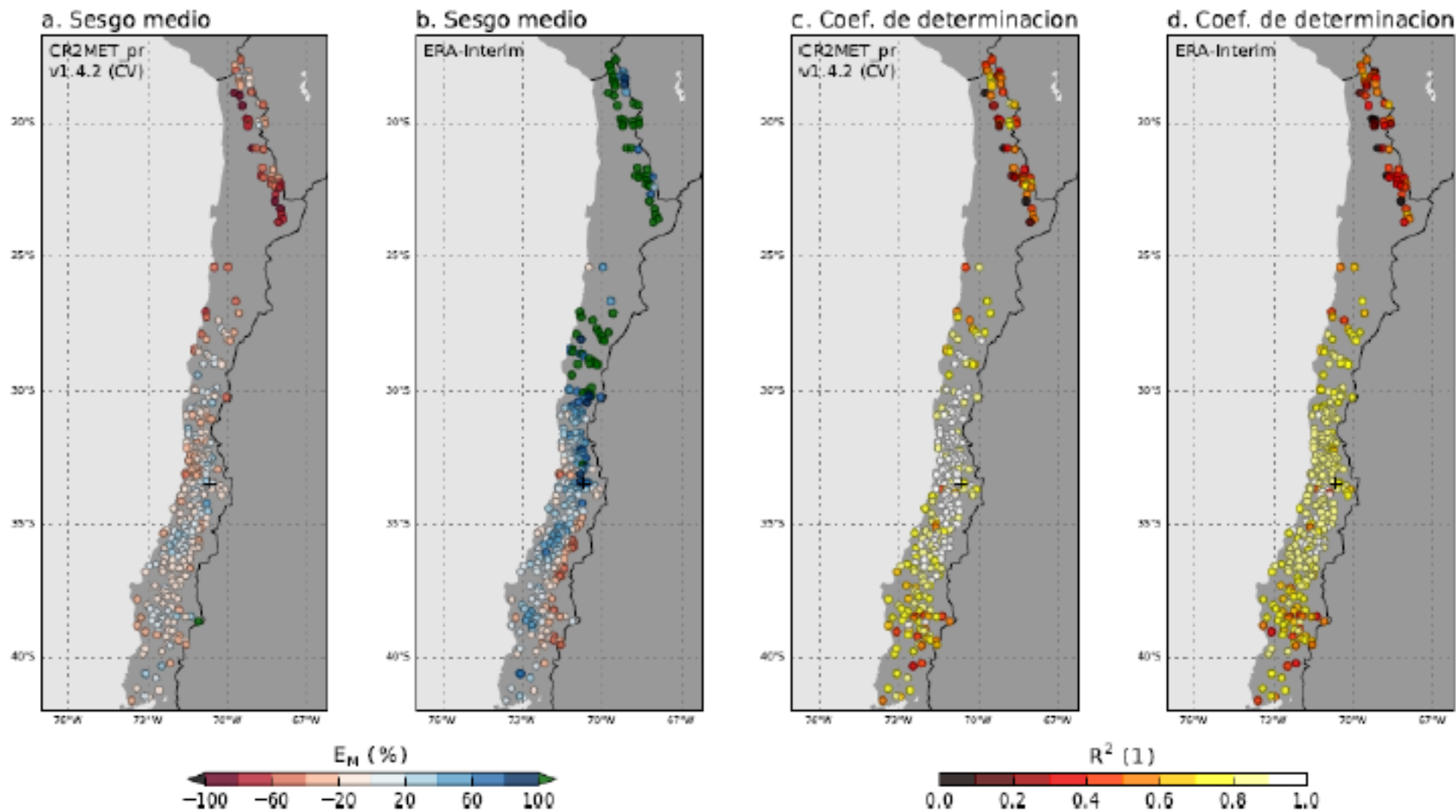
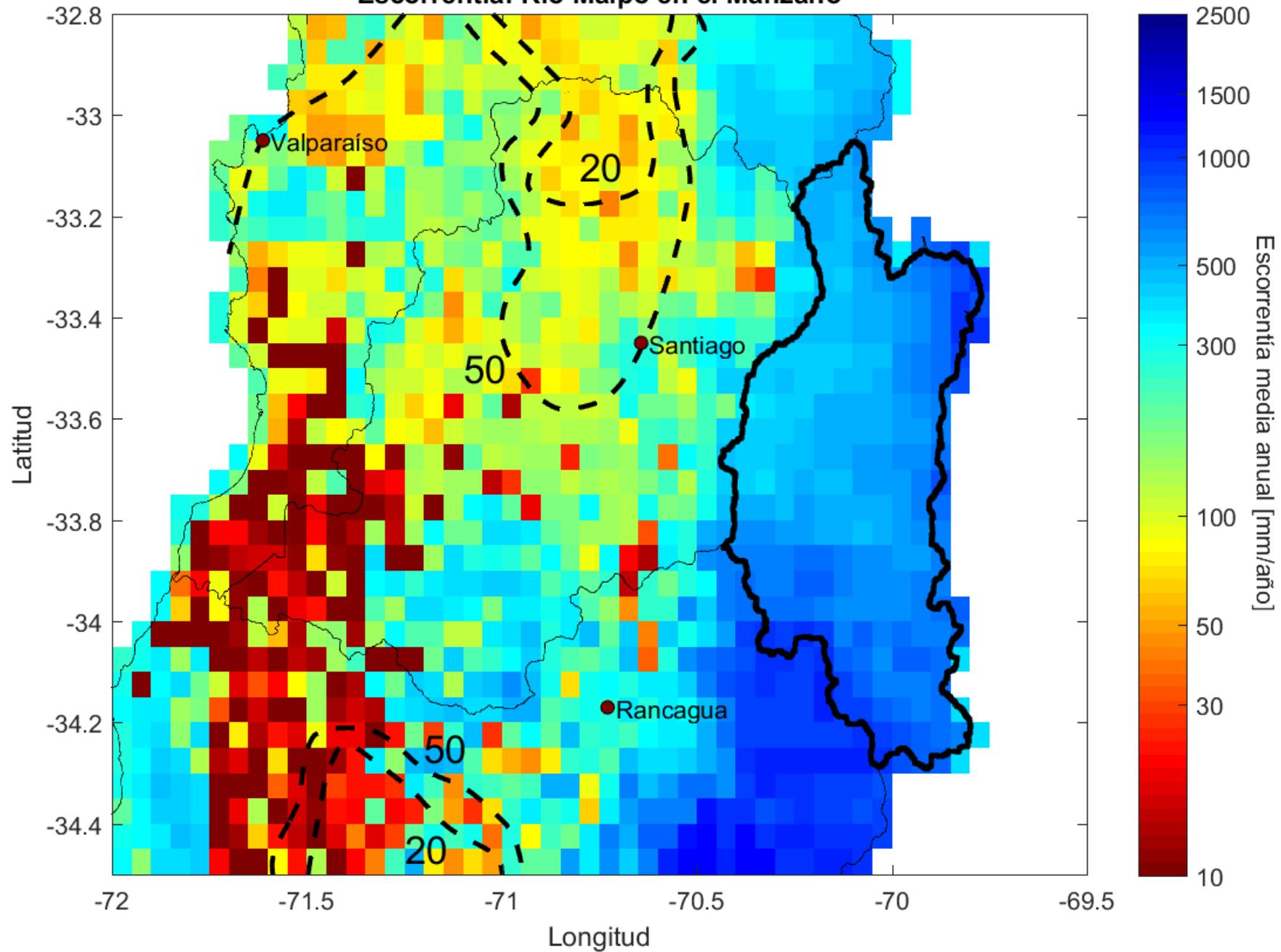


Figura 2.13: Diferencia entre la precipitación anual media (1979-2016) obtenida mediante validación cruzada con CR2MET y valores observados (a). Coeficientes de determinación entre valores anuales de precipitación estimados y observados (c). Para ilustrar el valor agregado del proceso de regionalización, los paneles (b) y (d) muestran el mismo análisis, pero para la precipitación obtenida directamente del reanálisis ERA Interim.

Escorrentía: Río Maipo en el Manzano

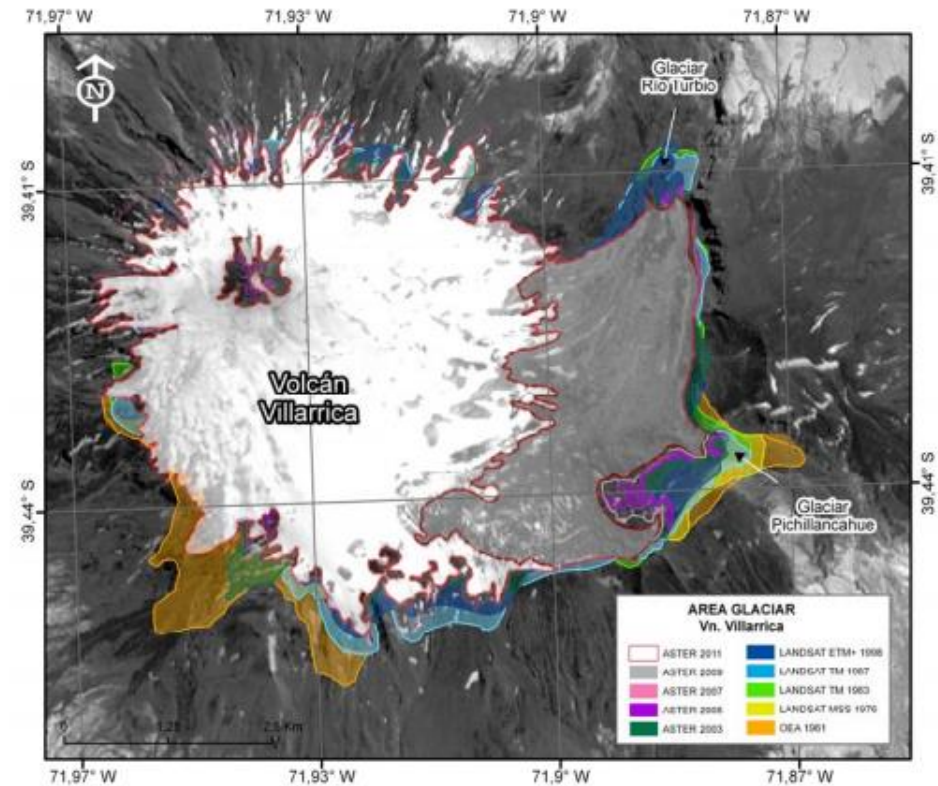


balance hídrico

obal.uc.cl

Caudal Glaciar (Q_{glaciar})

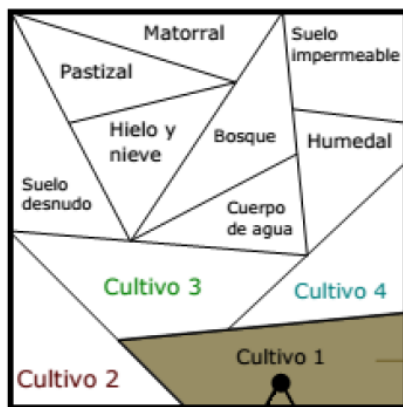
- Los glaciares NO se modelan en VIC: **se modela externamente a través de balance de energía (escala diaria) y masa (escala anual).**
 - Se utiliza información del inventario de glaciares de la DGA (1955 a la fecha).
- Principalmente glaciares en conos volcánicos de mayor altitud (Rivera, 1989)
 - Ecuación para relacionar área con volumen: $V = c A^b$
 - Calibración en base al **área glaciar.**
 - Q_{glaciar} asignado a la cuenca a la que pertenece.



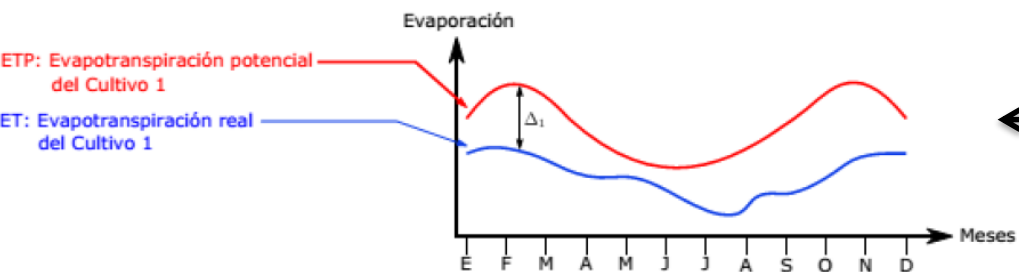
Demanda de riego (Q_{riego})

Cálculo de extracciones por riego en base a ETP y ETR de VIC

Distribución de coberturas vegetacionales en la celda

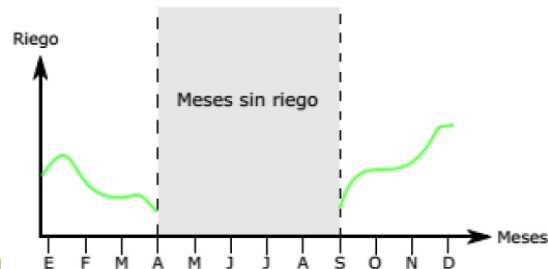


A_1 : Área del Cultivo 1
 η_1 : Eficiencia de riego del Cultivo 1



Resultados simulación en VIC

Régimen de riego del Cultivo 1



Lagos

Limitación código actual de VIC: El lago debe estar contenido en un único pixel.

