



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE
PROGRAMA DE DOCTORADO EN
INGENIERÍA DEL AGUA Y
MEDIOAMBIENTAL



iiama
Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y FACTORES ANTRÓPICOS EN LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA, COLOMBIA

Tesis Doctoral

Autora:

Ruth Karime Sedano Cruz

Directores:

Dr. Félix Francés García, Dr. Yesid Carvajal Escobar, y Dr. Jesús López de la Cruz

Valencia. Septiembre, 2017.



Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental



CONTENIDO

- ▶ **Introducción**
- ▶ **Objetivos**
- ▶ **Metodología**
- ▶ **Caso de estudio**
- ▶ **Resultados**
 - ▶ **Estacionariedad**
 - ▶ **Conexión con el embalse y la variabilidad climática**
 - ▶ **Modelación estadística no estacionaria**
- ▶ **Conclusiones y futuras líneas de investigación**

EXTREMOS HIDROLÓGICOS



Cundinamarca, 2010 (Semana.com)



Río Cauca. 01/2016 (Elcolombiano.com)

- ▶ Estudio de crecidas y estiajes es una de las principales líneas de investigación en Hidrología
- ▶ Mitigar efectos adversos de inundaciones y sequías
- ▶ Regular la oferta hídrica para favorecer el desarrollo sostenible

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

- ▶ Permite hacer inferencias sobre la magnitud y el tiempo de ocurrencia entre eventos extremos a través de funciones de distribución de probabilidad
- ▶ **La hipótesis de estacionariedad** ha sido la base el Analisis de Frecuencias
- ▶ Cambio de paradigma $Y_i \sim F(y_i; \theta)$ $\rightarrow$ $Y_i \sim F(y_i; \theta_i | X_i)$



- ▶ Identificar tendencias y cambios no paramétricos en los datos hidrológicos y en la función de distribución
- ▶ **La probabilidad de un evento de magnitud Y es variable en el tiempo**

MODELACIÓN ESTADÍSTICA NO ESTACIONARIA

Pros

Ante evidencias de n.i.i.d es necesario **incorporar la dinámica en las funciones** de probabilidad en el tiempo, en la representación de la realidad. Milly et al. (2015), (2008); Khaliq et al. (2006)

Modelos **representan mejor la variabilidad de los extremos** hidrológicos, frente a los modelos estacionarios. López & Francés (2014); Machado et al. (2015); Villarini & Strong (2014)

Permiten **comparar evolución del riesgo hidrológico** : Obeysekera & Salas (2016), Du et al. (2015); Serinaldi (2015)

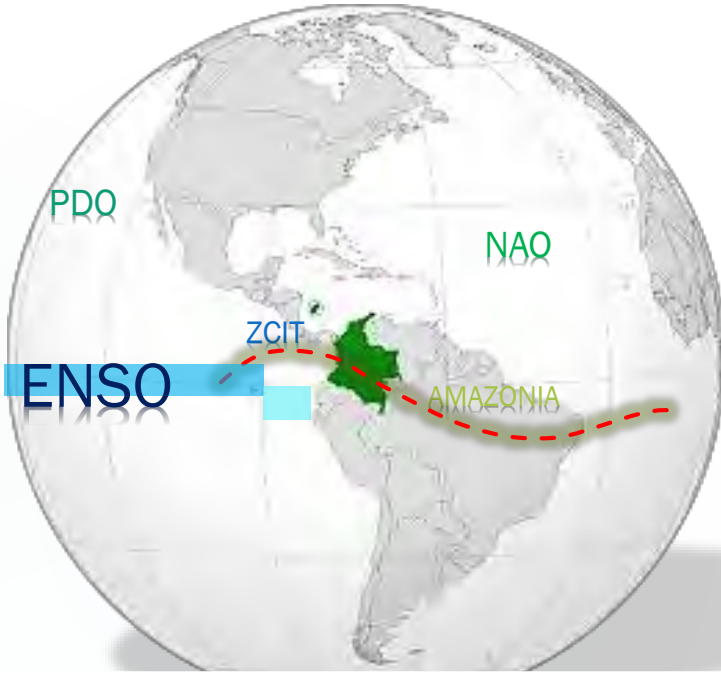
Contras

Modelos estacionarios dan un **marco racional útil** para proyectar el riesgo hidrológico, ...tendencias en el corto plazo vs persistencia de largo plazo pueden llevar a modelos estacionarios: Matalas (1997) ; Lins & Cohn (2011)

Alta incertidumbre en los modelos no estacionarios,
... tendencias estacionarias?

¿Como aplicar los resultados?
Montanari & Koutsoyiannis (2014); Serinaldi & Kilsby (2015)

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- ▶ Colombia: la tasa más alta de desastres naturales de Latinoamérica
 - ▶ El **84,7% de la población** y el 86,6% de los activos están localizados en áreas **expuestas a peligros naturales** (Banco Mundial, 2014)
 - ▶ **44% de los desastres son** inundaciones (Em-dat, 2016)
- 
- El diagrama muestra un globo terráqueo con una línea roja punteada que representa la conexión entre el fenómeno ENSO en el océano Pacífico (etiquetado como ENSO y PDQ) y la Amazonia (etiquetada como AMAZONIA). Se indican también las zonas de influencia ZCIT y NAO.
- ▶ Fuerte **conexión ENSO y la hidrología** de Colombia (Poveda, 2004) **y se prevé el aumento en frecuencia y severidad de ENSO en Suramérica** (Cai et al., 2015)
 - ▶ **Tendencias** en precipitación y caudales diarios (Cardona et al., 2016; Puertas & Carvajal, 2008)
 - ▶ Función de **distribución** de probabilidades de la serie de caudales máximos **cambia** con las fases de ENSO (Poveda & Álvarez, 2012)

OPORTUNIDAD PARA EVALUAR EL ANÁLISIS DE FRECUENCIAS NO ESTACIONARIO

Hipótesis: Forzamientos climáticos y de la actividad humana pueden ser términos aditivos adecuados para describir los cambios en los extremos hidrológicos del río Cauca

OBJETIVOS

Detectar y caracterizar la variabilidad de los eventos extremos del río Cauca por efecto de las variaciones climatológicas y antrópicas

- ▶ **Analizar la no estacionariedad** de los índices hidrológicos y definir ¿cual es la **influencia del embalse** y de la variabilidad climática?
- ▶ Contribuir al análisis del riesgo hidrológico **al modelar la no estacionariedad**, incorporando la influencia de ENSO y de la alteración antrópica en el análisis de:
 - ▶ Los caudales máximos **y mínimos anuales**
 - ▶ **La duración** de las crecidas y estiajes



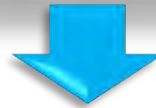
OBJETIVOS

- ▶ **Comparar diferentes métodos de AF no estacionario para indicar:**
 - ▶ ¿Cuál es el conjunto de covariables adecuado para representar el comportamiento de los caudales extremos en el tiempo?
 - ▶ ¿El diseño de las obras bajo la hipótesis de estacionariedad, es correcto en la actualidad?

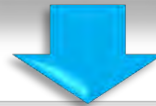


Metodología

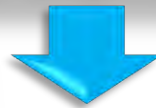
Selección de las variables hidrológicas



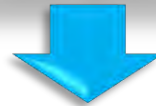
Pruebas de estacionariedad



Variables explicativas



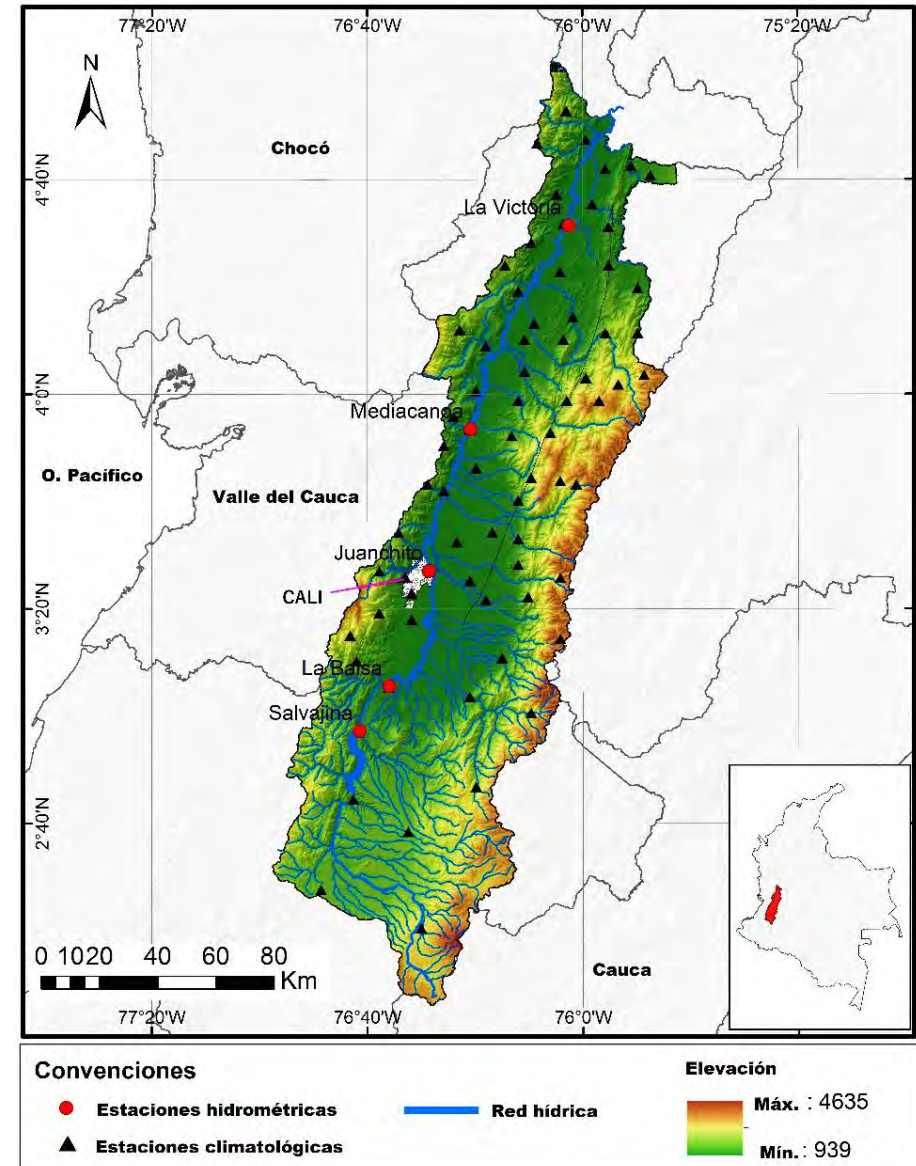
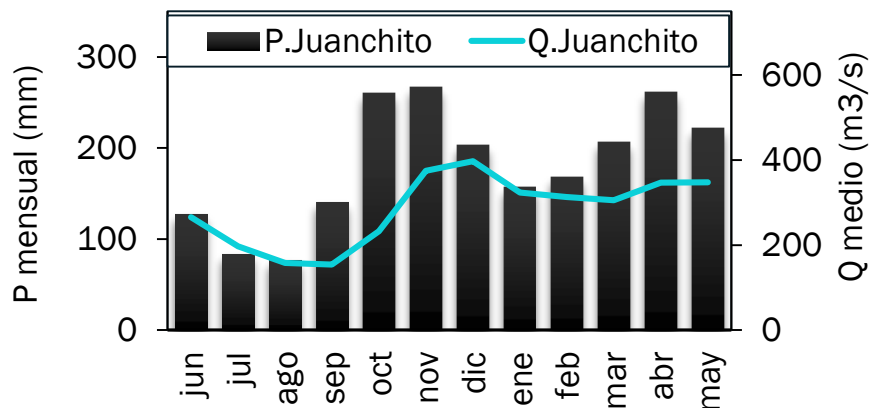
Estimación de parámetros



Selección de modelos e interpretación

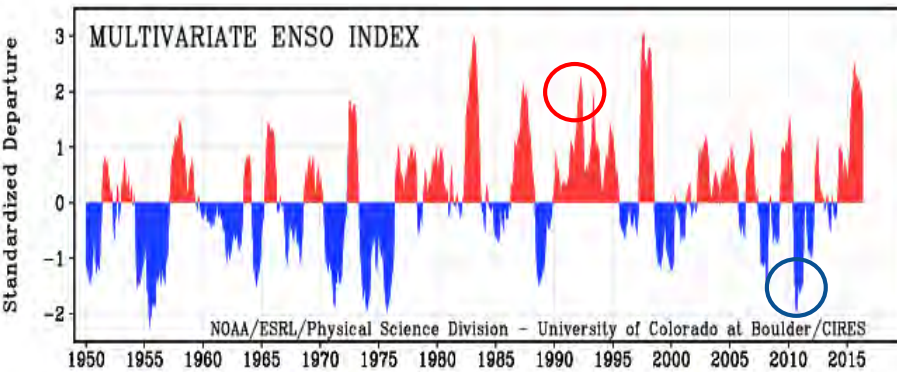
VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA, COLOMBIA

- ▶ Población: 4.6 millones
- ▶ Región Andina suroccidental
- ▶ Clima tropical
- ▶ Área de estudio: 16,296 km²
- ▶ Área inundable: 840 km²
- ▶ Desde 1985:
 - ▶ Regimen hidrológico regulado
 - ▶ 5 inundaciones y 5 sequías (CVC, 2010; DesInventar, 2015)



EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR EN COLOMBIA

EL NIÑO: **sequías**, Incendios forestales, cortes de energía, oleadas de calor, desertificación heladas...



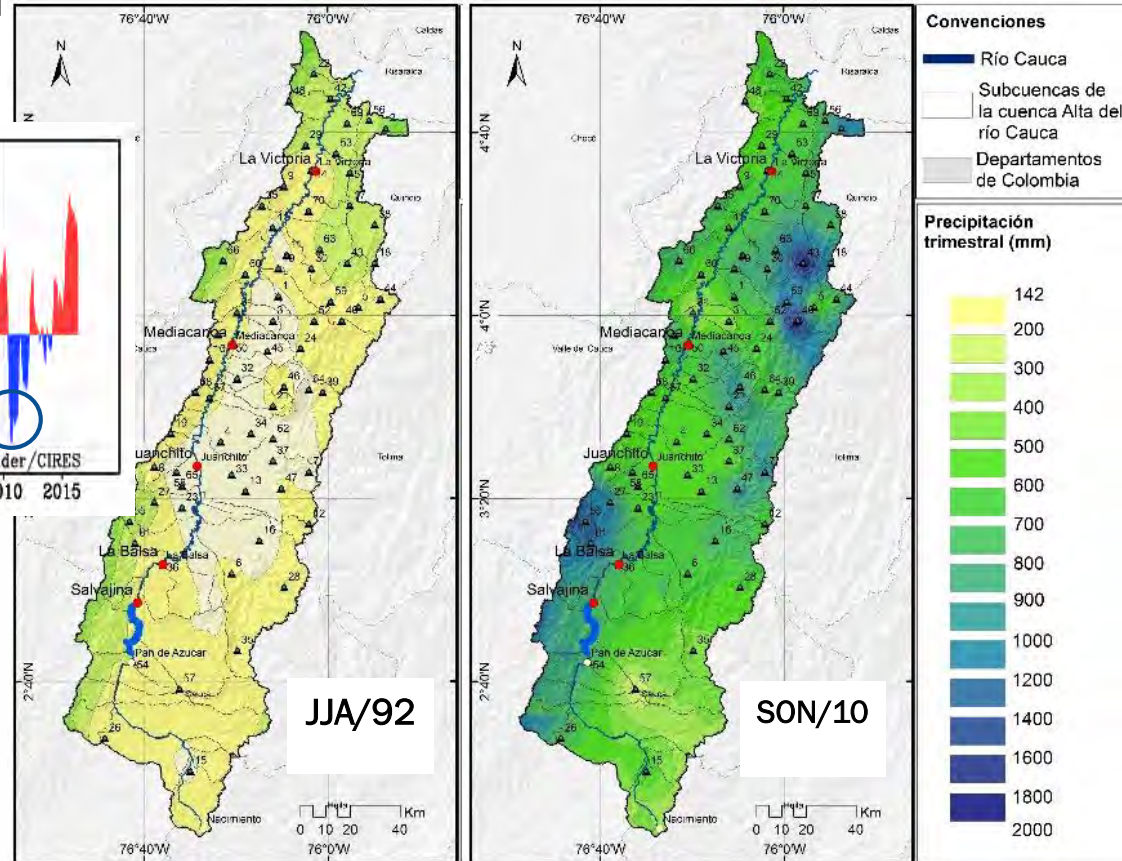
LA NIÑA: **Inundaciones**, deslizamientos de tierra, enfermedades, plagas...

- Eventos históricos ENSO:

La Niña [1988](#), [2010](#)

El Niño: [1986](#), [1991](#), [1997](#), [2015](#)

(Wolter & Timlin, 2011)



DATOS HIDROLÓGICOS CUENCA VALLE ALTO

Fuentes: CVC e IREHISA – Univalle

- ▶ Caudal diario, m^3/s
- ▶ Nivel de agua en embalse
- ▶ Batimetrías embalse
- ▶ Periodo común: 1965-2015 (50 años)

▼ Régimen natural: 1 estación

● Régimen alterado: 3 estaciones

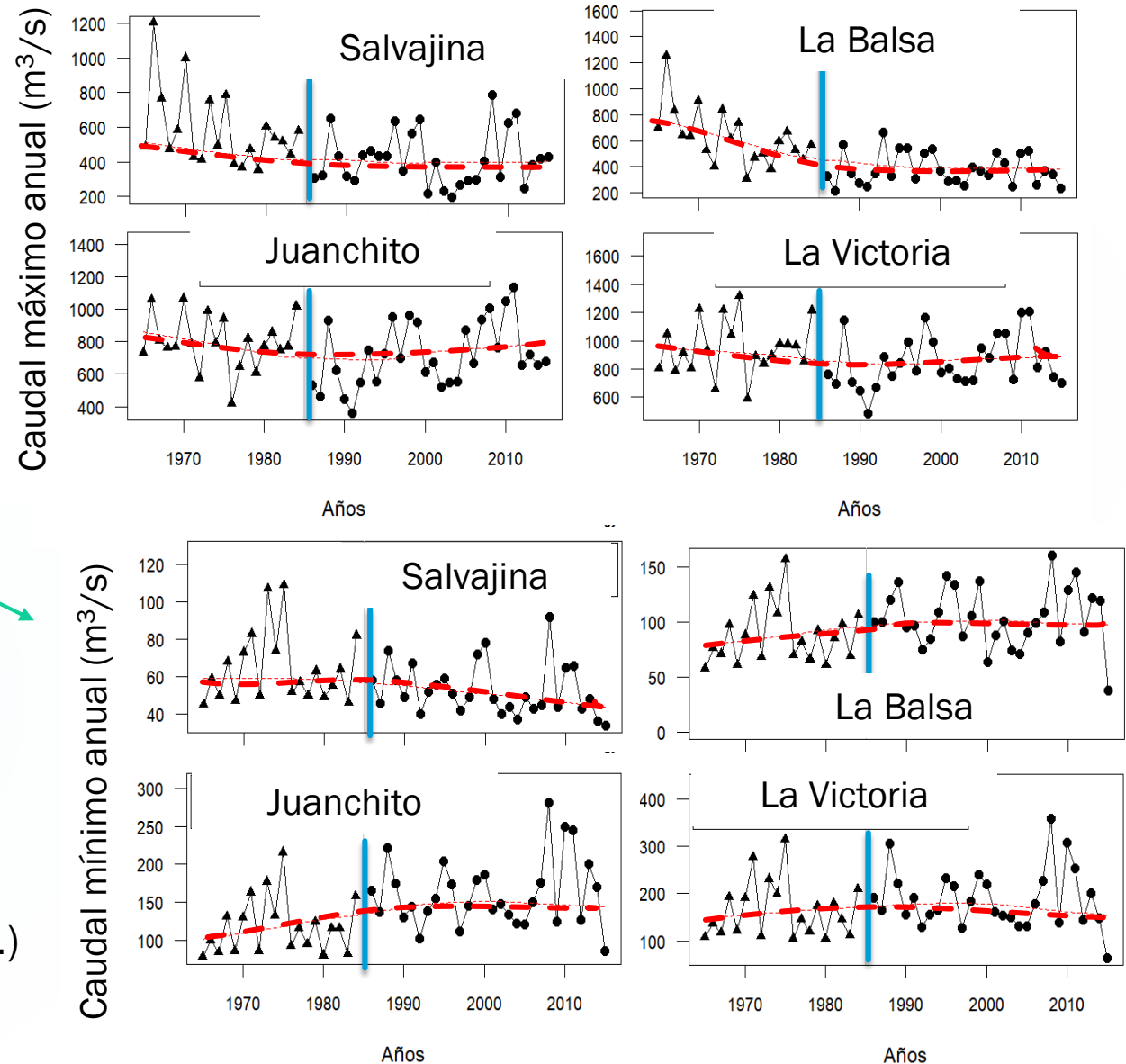


Estación	Área	Área regulada	Q. medio (m^3/s)		Q. máx (m^3/s)		Q. mín (m^3/s)	
	(km^2)	(%)	65-84	86-15	65-84	86-15	65-84	86-15
Salvajina	3,652	0	143	127	487	475	49	34
La Balsa	5,111	71	206	176	639	432	64	51
Juanchito	8,556	43	288	291	828	829	94	88
La Victoria	16,296	22	411	386	1,036	991	126	106

VARIABLES HIDROLOGICAS: CAUDAL MÁXIMO Y MÍNIMO

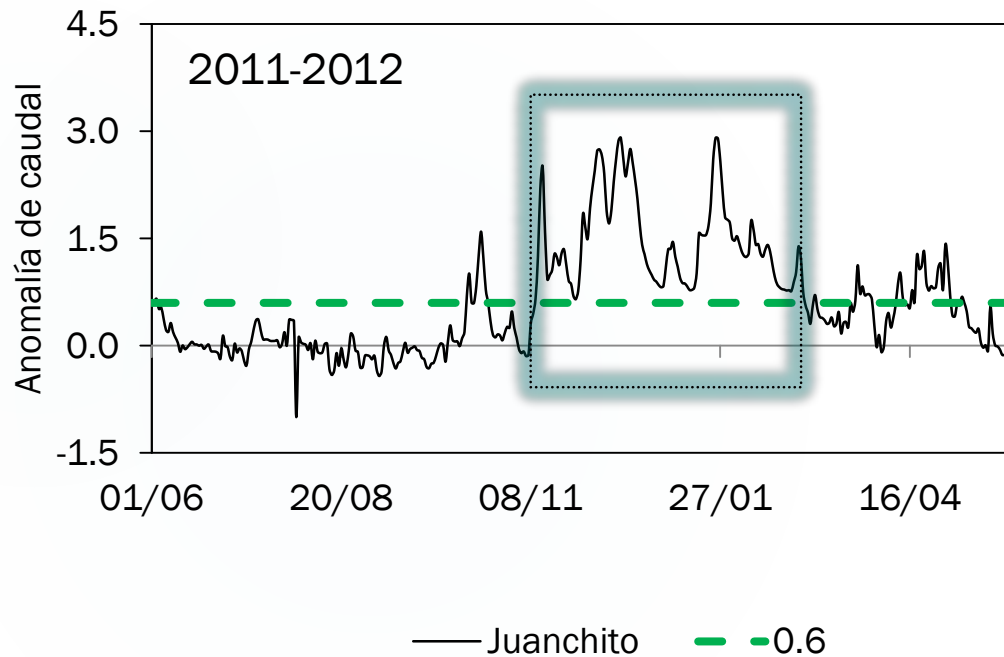
- ▶ Caudal diario máximo anual en m^3/s

- ▶ Caudal mensual mínimo anual en m^3/s

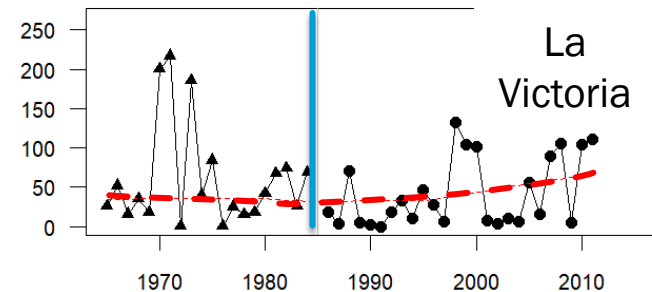
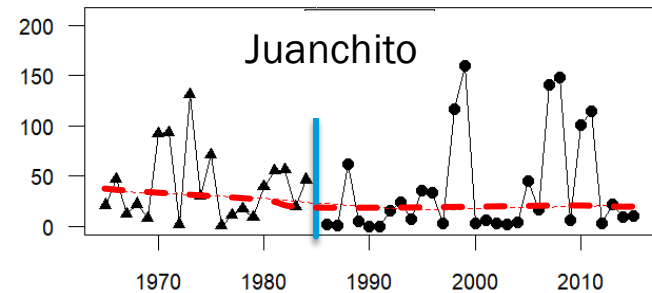
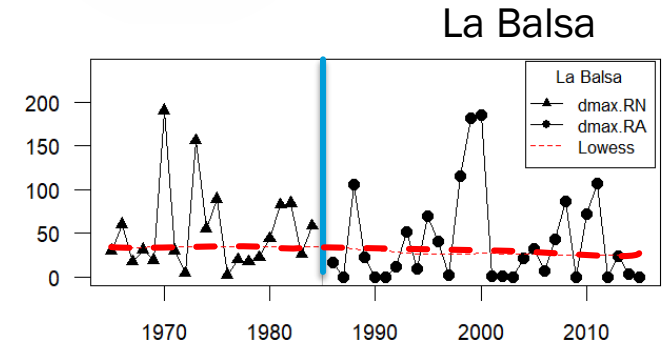


VARIABLES HIDROLOGICAS: DURACIÓN CRECIDAS

- **Anomalía de Caudal:** $a_q = \frac{(Qd - Qm)}{Qm}$
- **Umbral crecidas:** $a_q \geq 0.6$



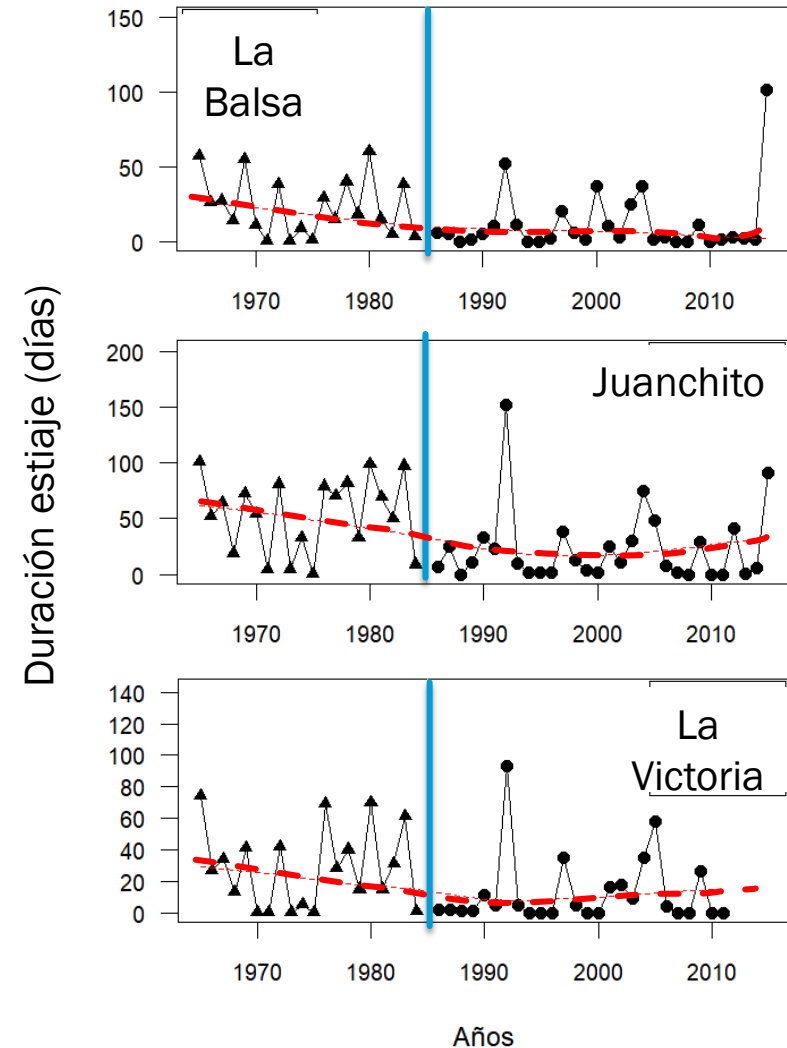
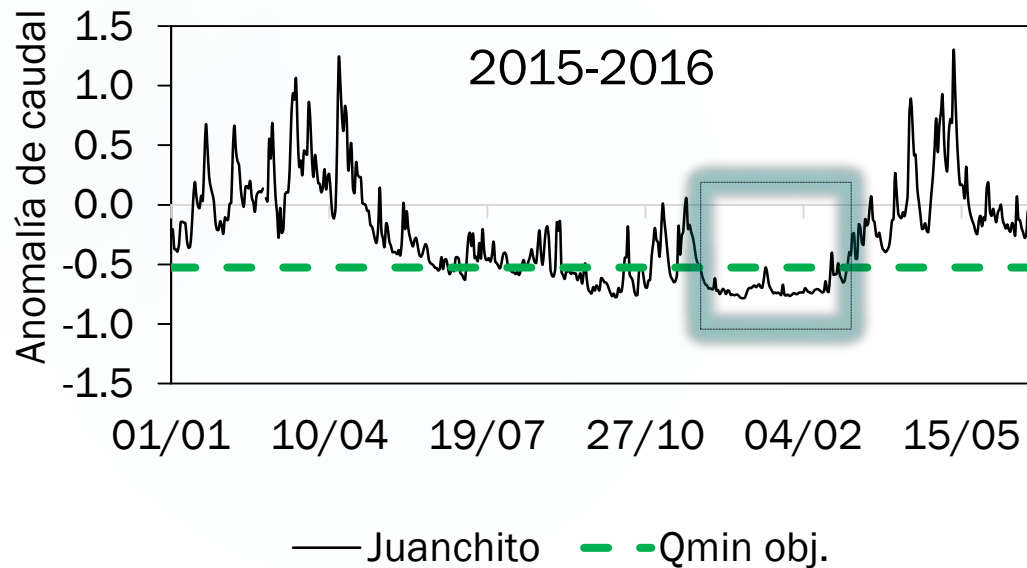
Duración crecidas (días)



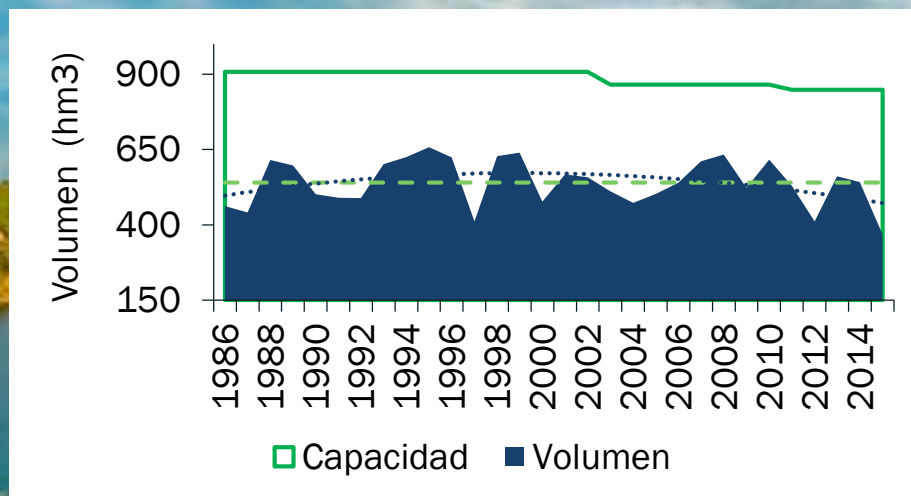
Años

VARIABLES HIDROLOGICAS: DURACIÓN ESTIAJE

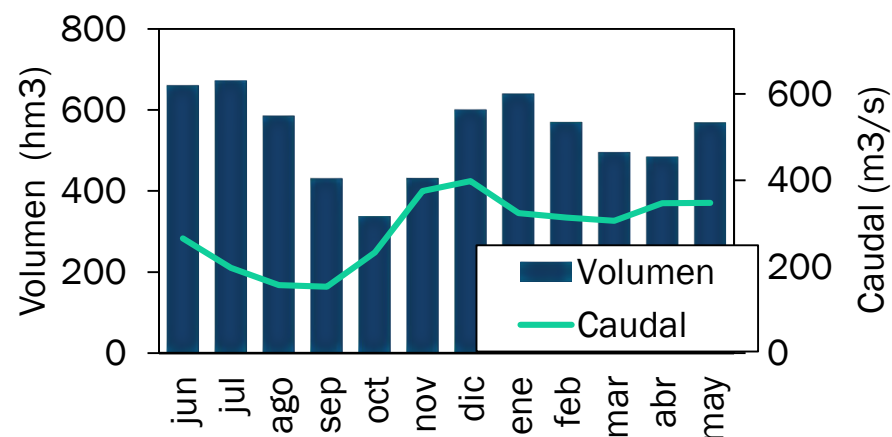
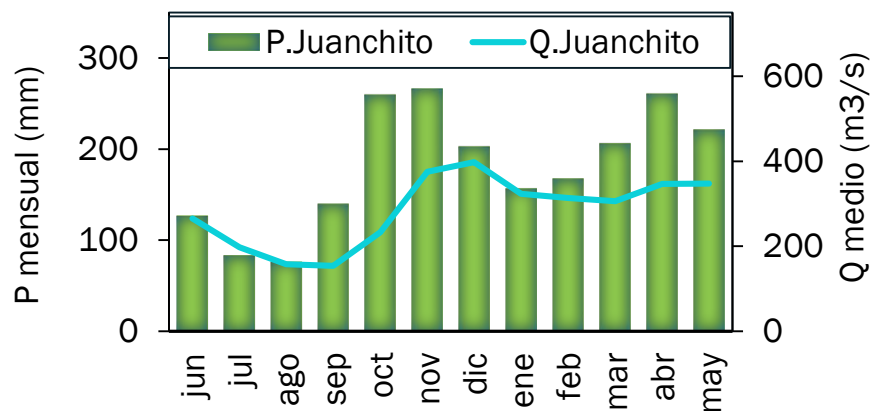
- ▶ Umbral estiaje: $Q_d \leq Q_{90_{JJA}}$
- ▶ En Juanchito: $Q_d \leq 140 \text{ m}^3/\text{s}$
- ▶ Ventana donde se registra el valor máximo/mínimo
- ▶ Separación ≥ 10 días



VARIABLES EXPLICATIVAS: VOLUMEN EMBALSE LA SALVAJINA

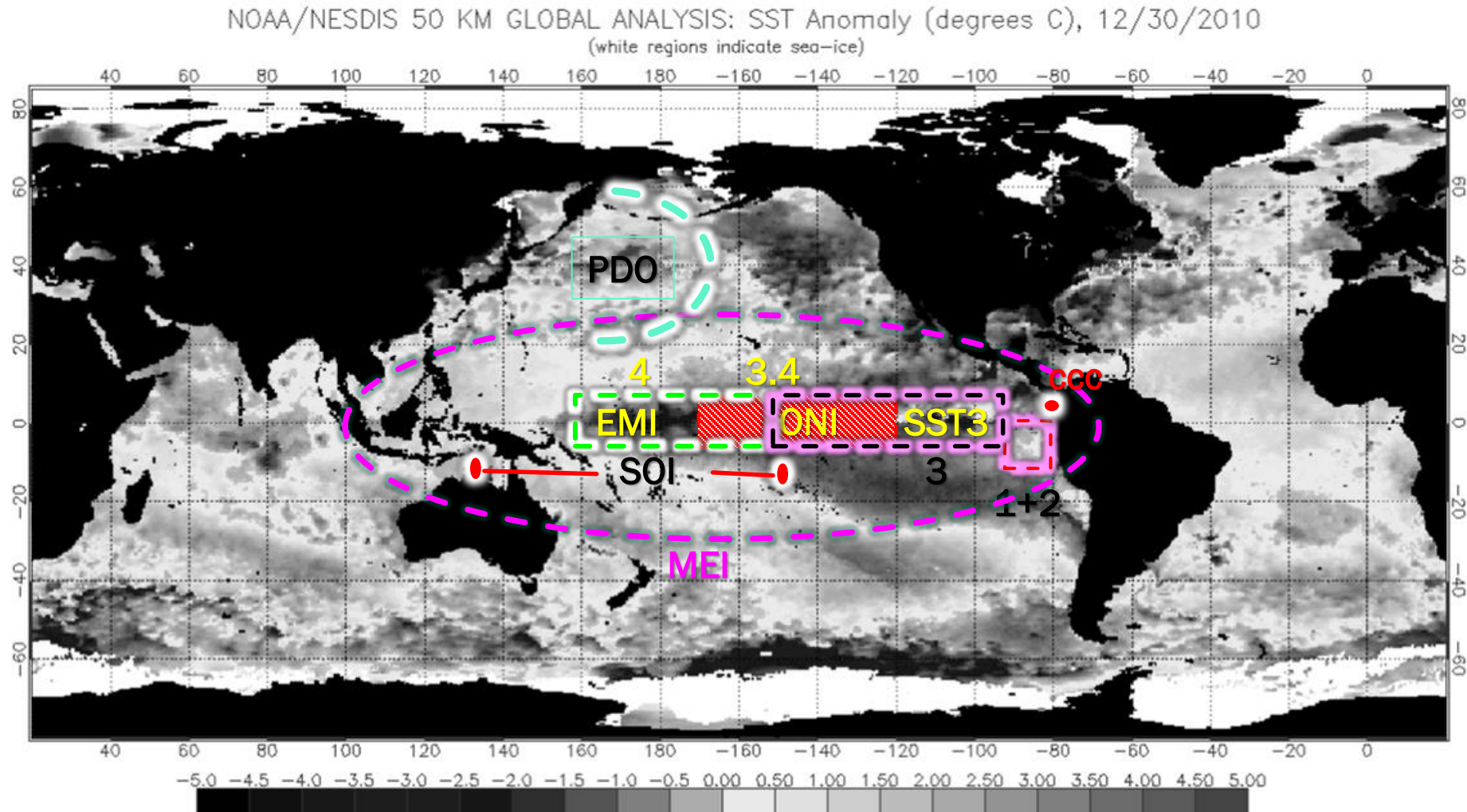


- ▶ Multipropósito
- ▶ Operativo desde 1985
- ▶ Capacidad 840 hm³
- ▶ Objetivos:
 - ▶ Caudal máx. ≤ 900 m³/s
 - ▶ Caudal mín. ≥ 130 m³/s

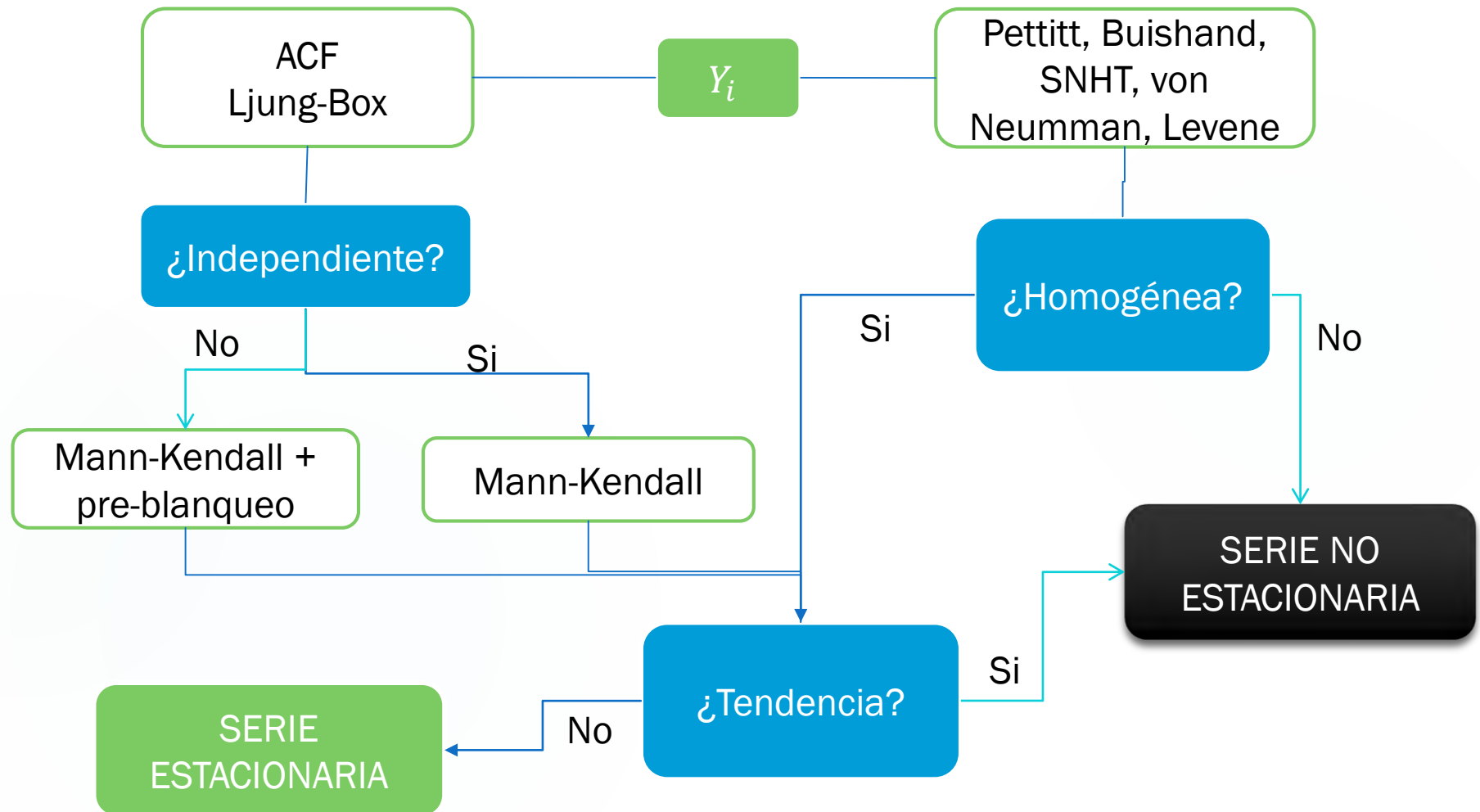


VARIABLES EXPLICATIVAS: INDICES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA

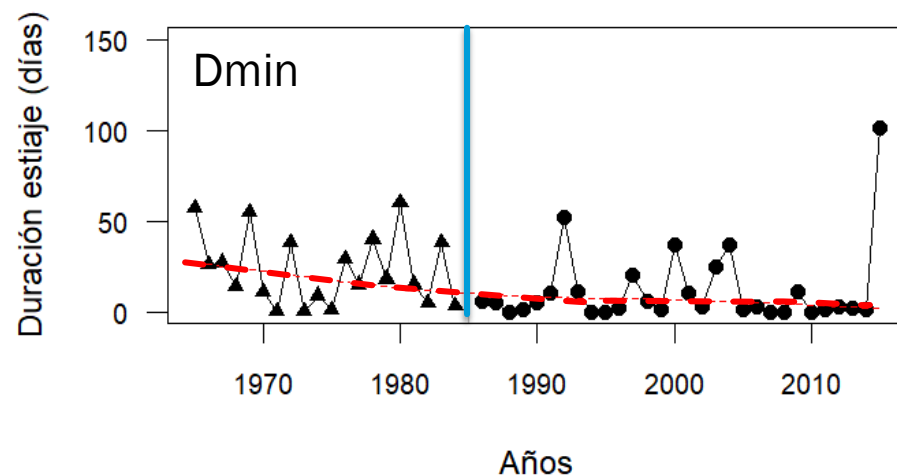
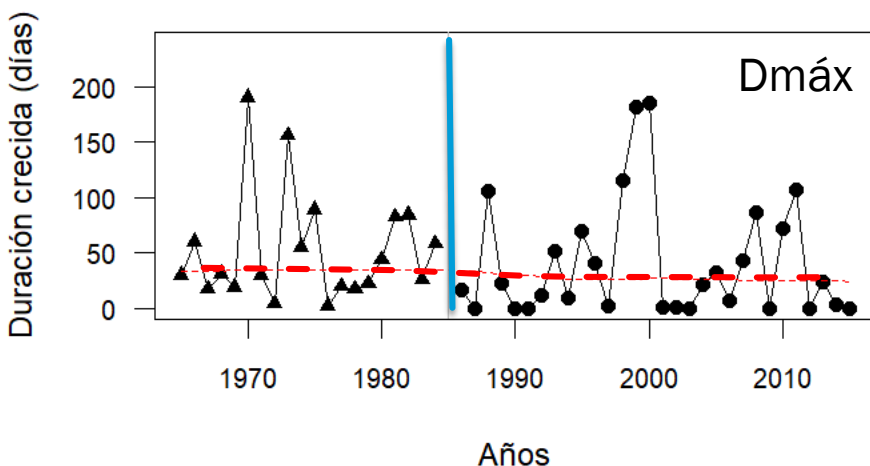
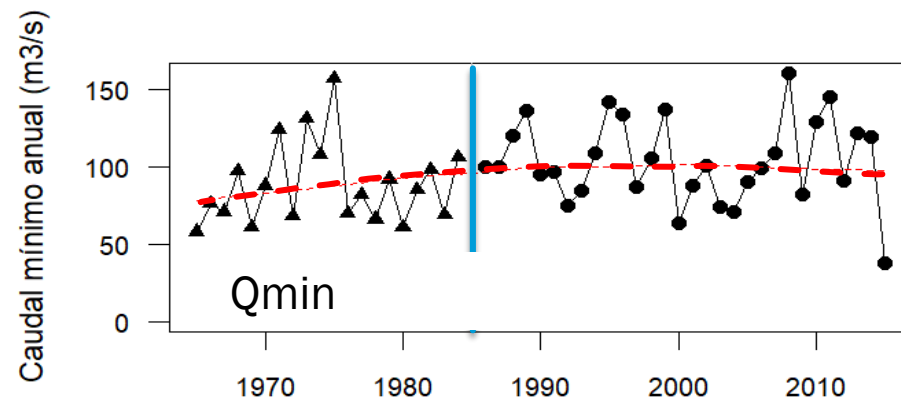
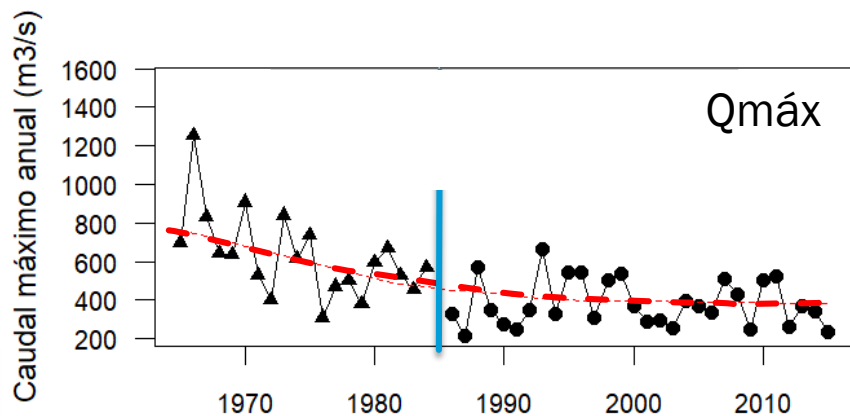
Fuentes: NOAA/NCEP-NCAR *Reanalysis I* - ESRL; JISAO- U. Washington; JAMSTEC



ESTACIONARIEDAD



ESTACIONARIEDAD LA BALSA



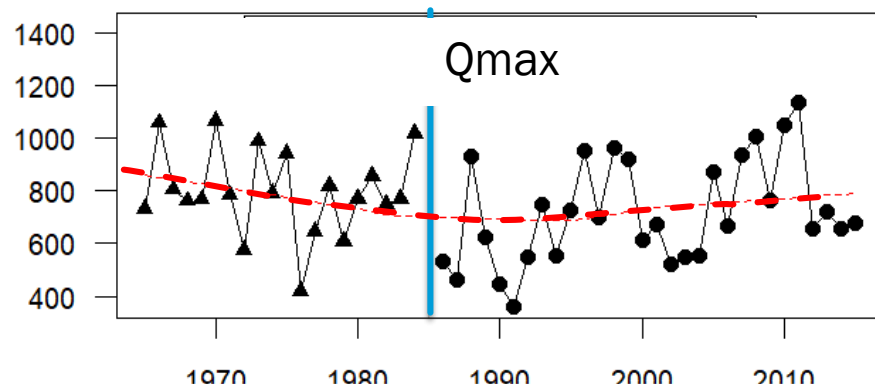
- Crecidas y estiajes n.i.i.d
- Duración de las crecidas es i.i.d
- Duración del estiaje n.i.i.d.

Periodo	65-15	65-84
Variable	Qmax	Qmax
PET	84 P1	75 P5
ACF	P5	P5
M-K	P1.-0.33	P5. -0.38

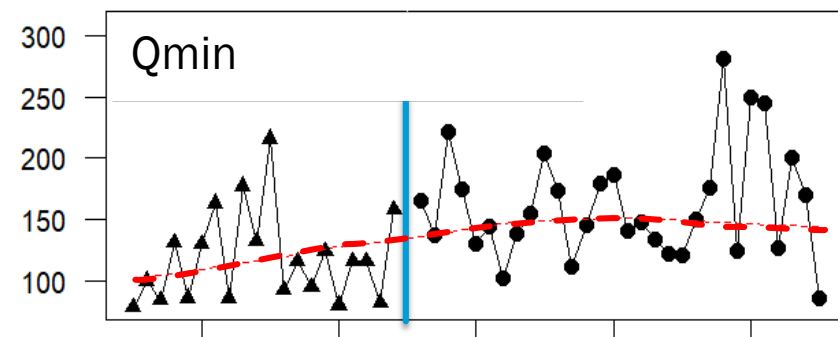
ESTACIONARIEDAD JUANCHITO



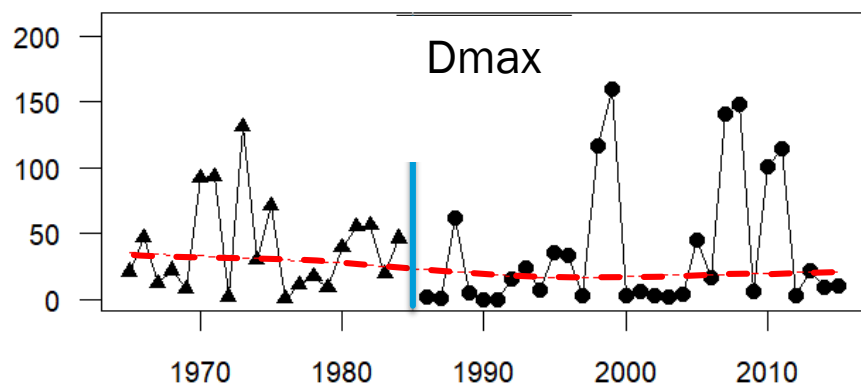
Caudal máximo anual (m³/s)



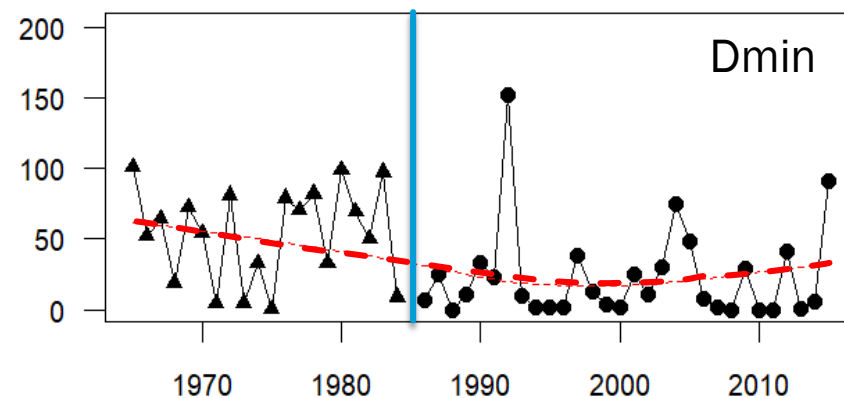
Caudal mínimo anual (m³/s)



Duración crecida (días)



Duración estiaje (días)



Años

- Crecidas, estiajes y duración de crecidas i/n.i.d.
- Duración del estiaje n.i/n.i.d.

Periodo	86-15	86-15
variable	Qmax	Dmax
PET	1994 P5	
M-K	P5 (0.29)	(0.23) P10

Periodo	65-15	65-15
variable	Qmin	Dmin
PET	1983 P1	1983 P1
M-K	P1. (0.26)	P5. (-0.23)

SINTESIS HIPOTESIS DE ESTACIONARIEDAD

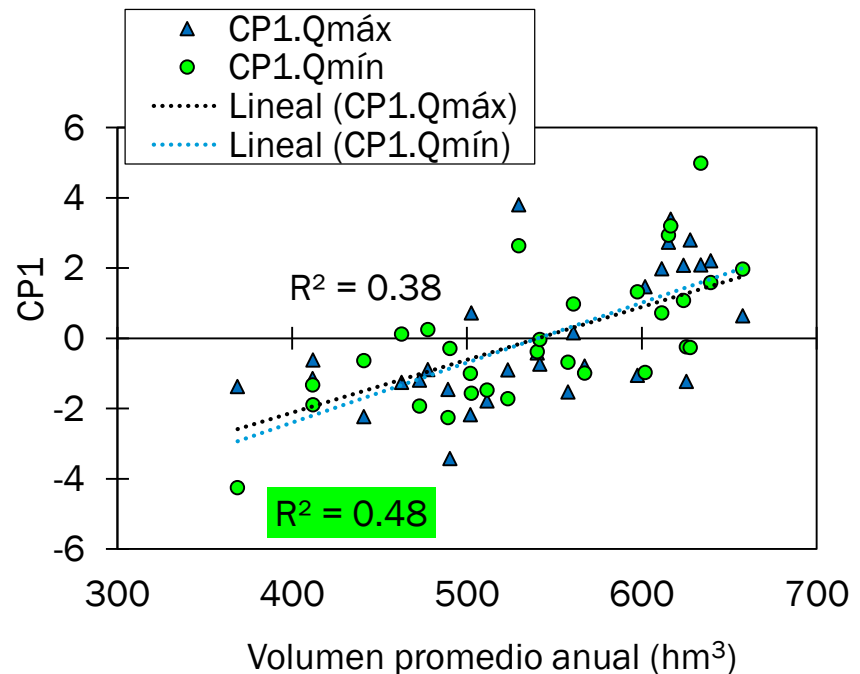
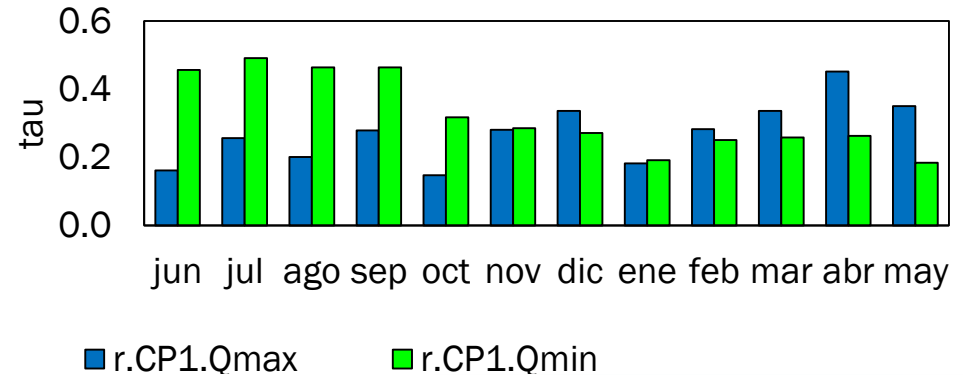
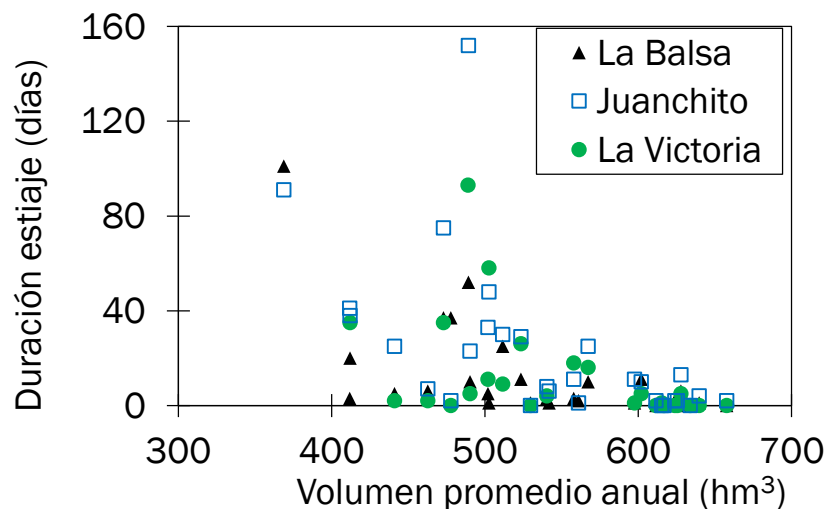
1965-2015	Salvajina	La Balsa	Juanchito	La Victoria
Q _{máx}	(-) NS	n.i. n.i.d: (-) P1	(-) NS	(-) NS
Q _{mín}	n.i.d: (-) P1 99 P5	(+) NS n.i.d: 83 P1	(+) P5 n.i.d: 83 P5	(+) NS
D _{máx}		(-) NS	(-) NS	NS
D _{mín}		n.i. n.i.d: (-) P5 83 P1	n.i. n.i.d: (-) P5 83 P5	n.i. (-) NS

1986-2015	Salvajina	La Balsa	Juanchito	La Victoria
Q _{máx}	NS	(-) NS	n.i.d: (+) P10 94 P5	(+) NS
Q _{mín}	n.i.d: (-) P5 00 P5	(-) NS	(+) NS	(-) NS
D _{máx}		NS	n.i.d: (+) P10	n.i.d: (+) P10
D _{mín}		(-) NS n.i.d: 14 P5	(-) NS	(-) NS



n.i.: no independiente
n.i.d: no estacionario
NS: no significativo
P1: p-valor < 0.01

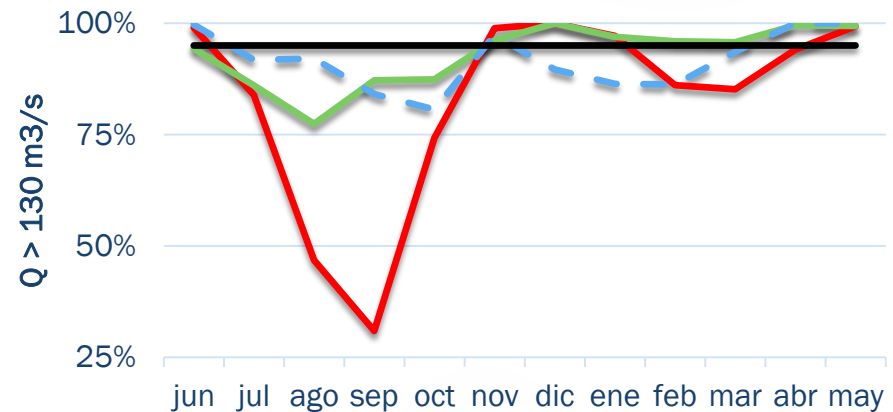
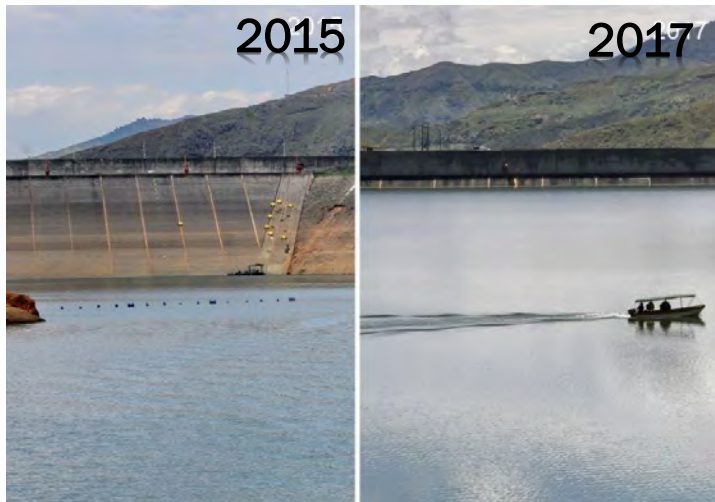
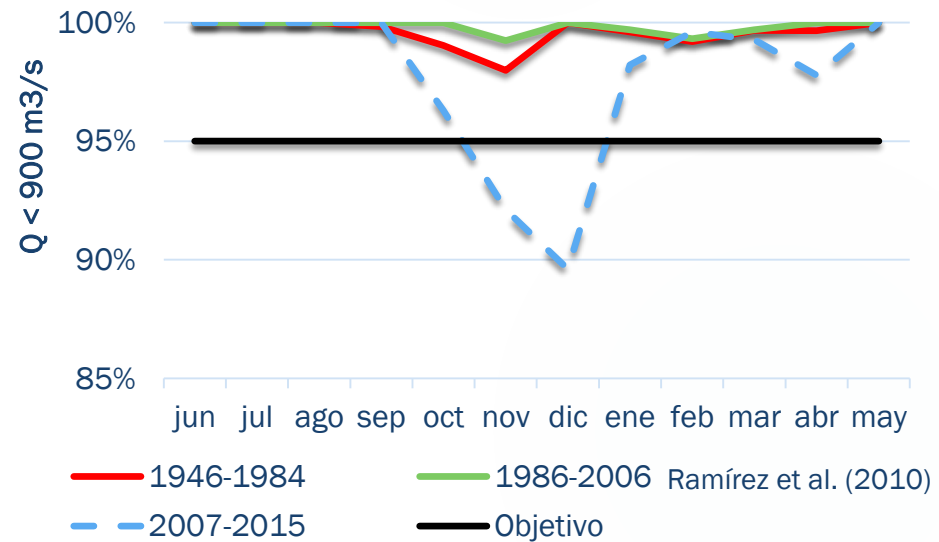
CONEXIÓN ENTRE EL EMBALSE Y LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS



OBJETIVOS DE OPERACION DEL EMBALSE

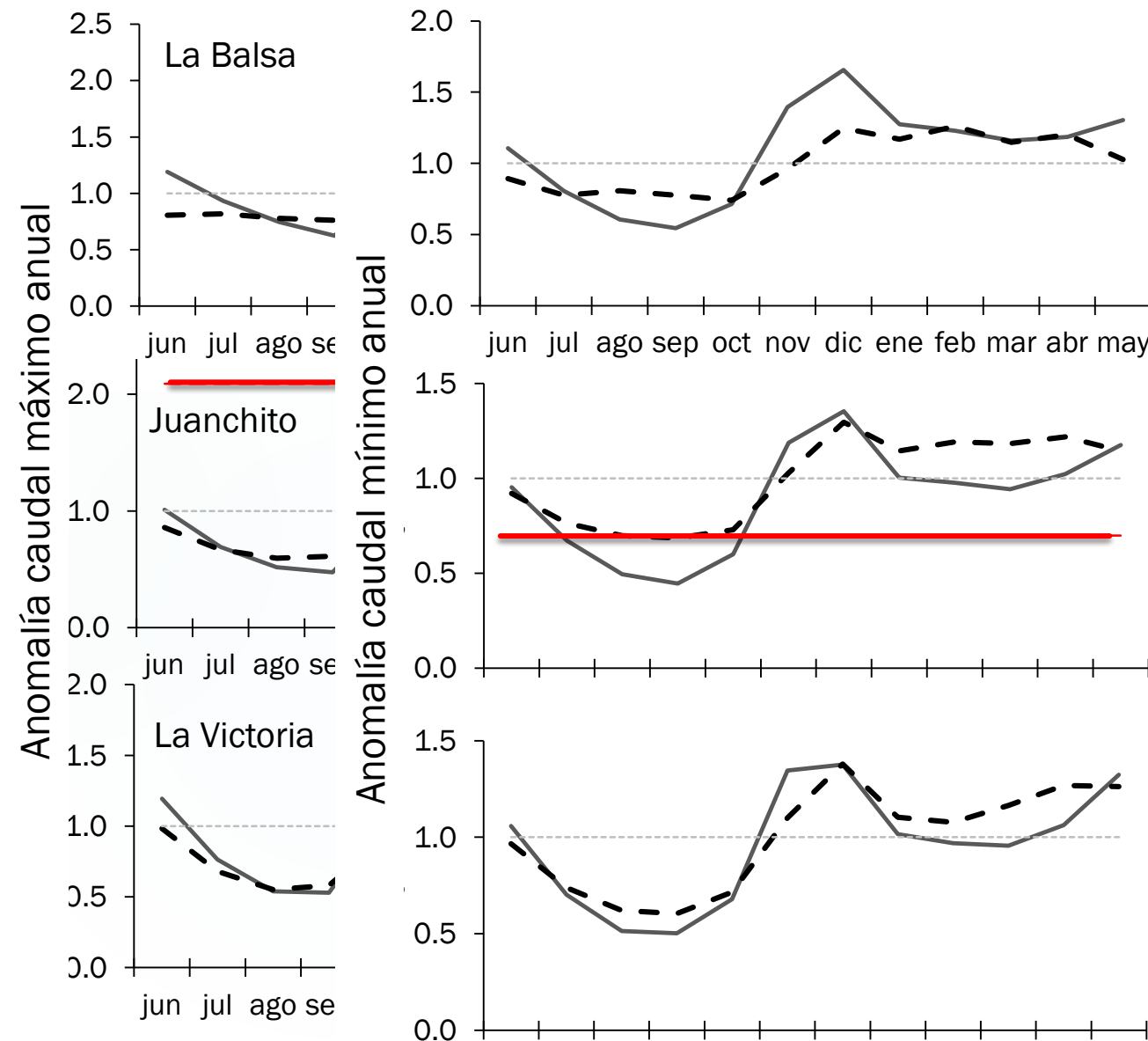
- ▶ El beneficio económico
- ▶ Garantizar el 95% del tiempo caudales diarios entre $130 \text{ m}^3/\text{s}$ y $900 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación

Juanchito.



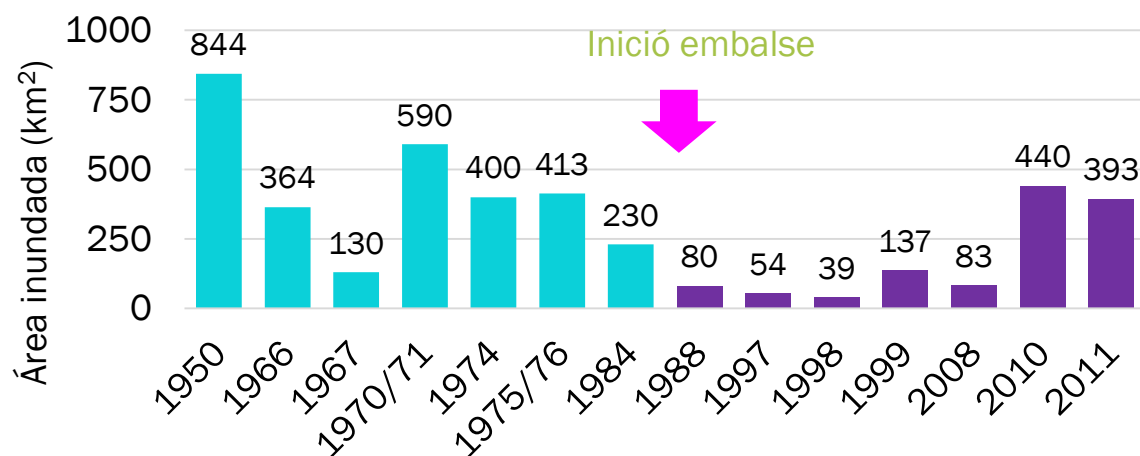
ALTERACIÓN ANTRÓPICA DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

— 1965-1984 - - 1986-2015 - - - Media - - - - Caudal objetivo



CRECIDAS HISTÓRICAS EN JUANCHITO

El País.com.co



Año			1988	1998	1999	2008	2010	2010	2011
Variabilidad climática	ONI		-1.2	-1.1	-1.1	-0.3	-1	-0.6	-1.2
	Ascenso		24	95	58	12	36	73	36
Duración (días)	Total		68	127	208	108	72	115	119
	m³/s		929	966	920	1009	991	1092	1135
Origen escurrimiento	Embalse	%	35	32	37	27	27	19	26
	Tributarios	%	65	68	63	73	73	81	74

SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN JUANCHITO

Año hidrológico (inicial)		1991	1997	2002	2004	2006	2009	2014
Variabilidad climática	ONI	1.1	1.6	0.7	0.6	0.4	0.7	1.8
Duración sequía	(meses)	16	11	10	8	5	10	20
Caudal mín.(m ³ /s)	Juanchito	102	112	134	122	150	124	86
Origen del escurrimiento (%)	Embalse	61	80	81	93	78	66	56
	Tributarios	39	20	19	7	22	34	44



- ▶ Entre 2006 y 2009: 102 cortes del servicio de agua en Cali debidos a:
 - ▶ Carga contaminante (durante crecidas y estiajes)
 - ▶ Bajos niveles en el río Cauca

ÍNDICE DE EMBALSE IE1

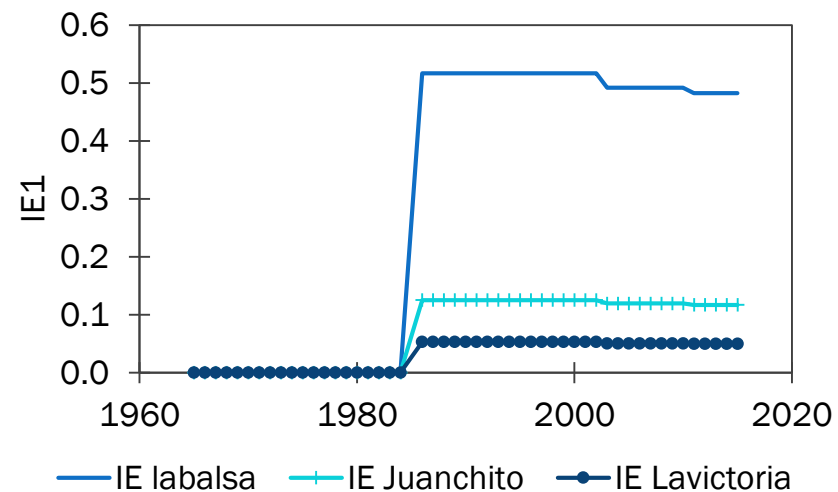
$$IE1 = \sum_{i=1}^N \frac{A_{Ei}(t)}{A_T} \cdot \frac{C_E(t)}{\bar{C}(t)}$$

López y Francés (2013)

- ▶ $A_{Ei}(t)$: área de drenaje al embalse en km²,
- ▶ A_T : área de drenaje a la estación de aforo en km²,
- ▶ C_E : capacidad de almacenamiento del embalse en Hm³
- ▶ $\bar{C}$: escurrimiento promedio anual en la estación de aforo en Hm³
- ▶ N : número de embalses aguas arriba de la estación



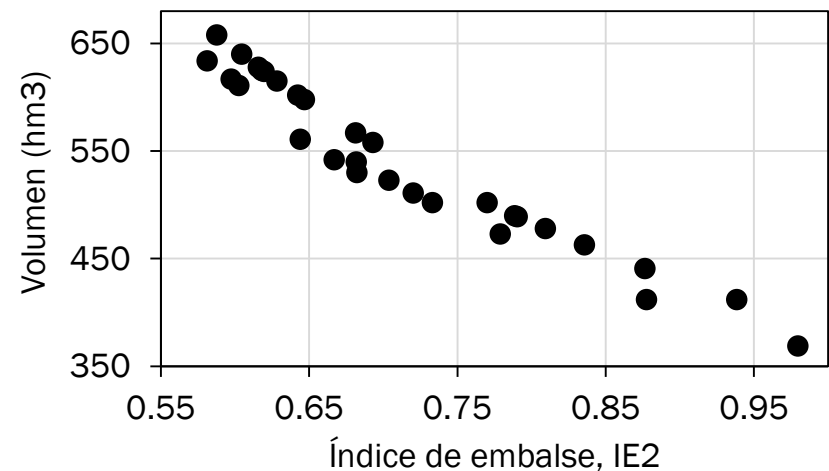
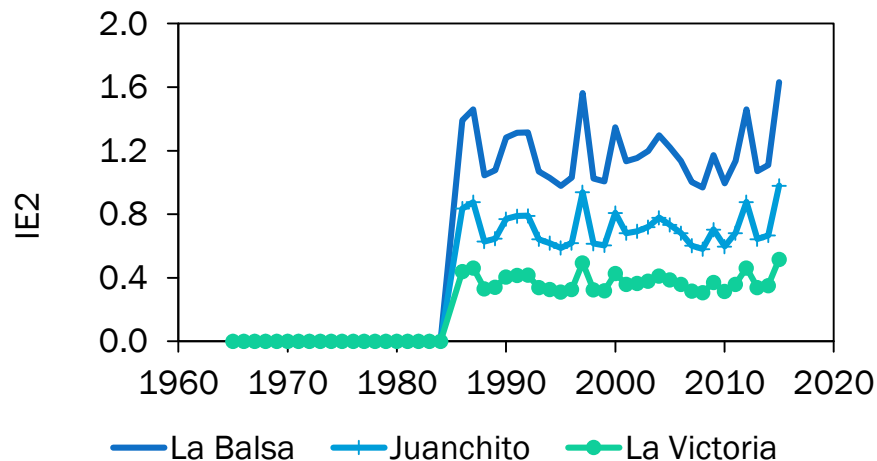
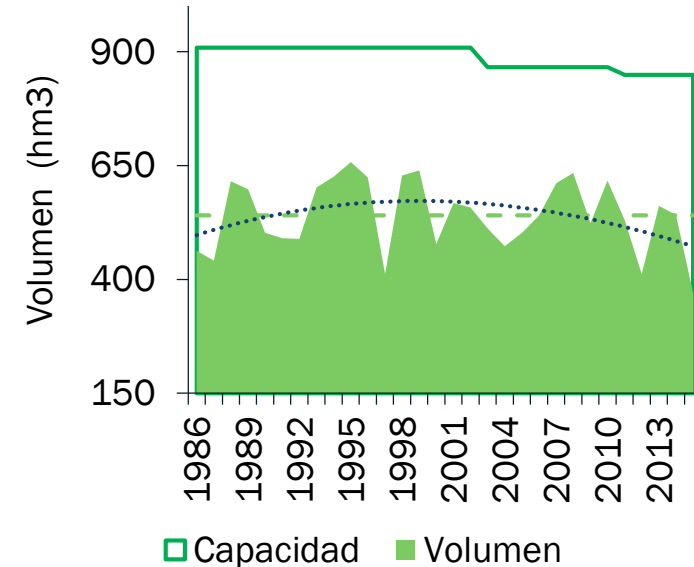
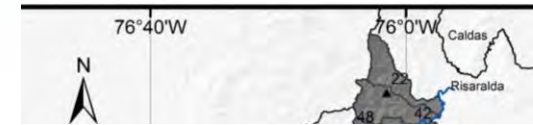
Estación	Área	$\frac{A_{Ei}(t)}{A_T}$	Caudal medio (m ³ /s)		$\bar{C}$	$\frac{C_E(t)}{\bar{C}(t)}$
	(km ²)	(%)	65-84	86-15	(hm ³)	(%)
La Balsa	5,111	0.71	206	176	1,246	0.68
Juanchito	8,556	0.43	288	291	3,089	0.27
La Victoria	16,296	0.22	411	386	3,863	0.22



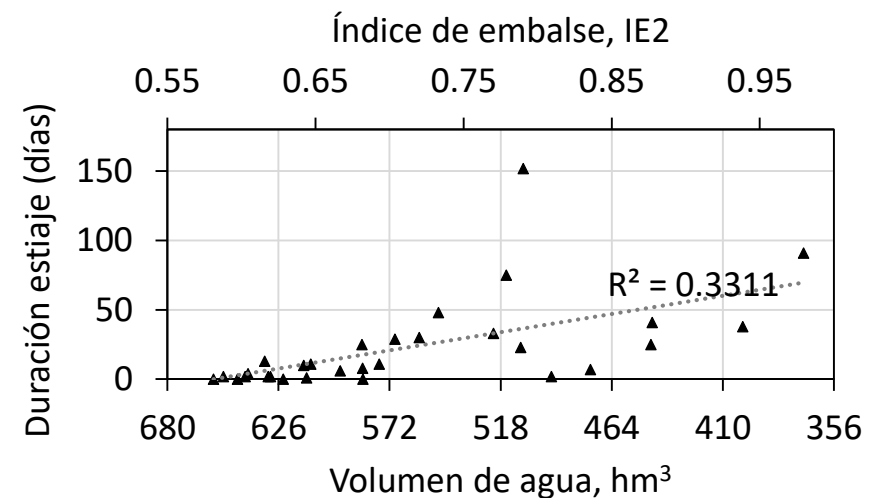
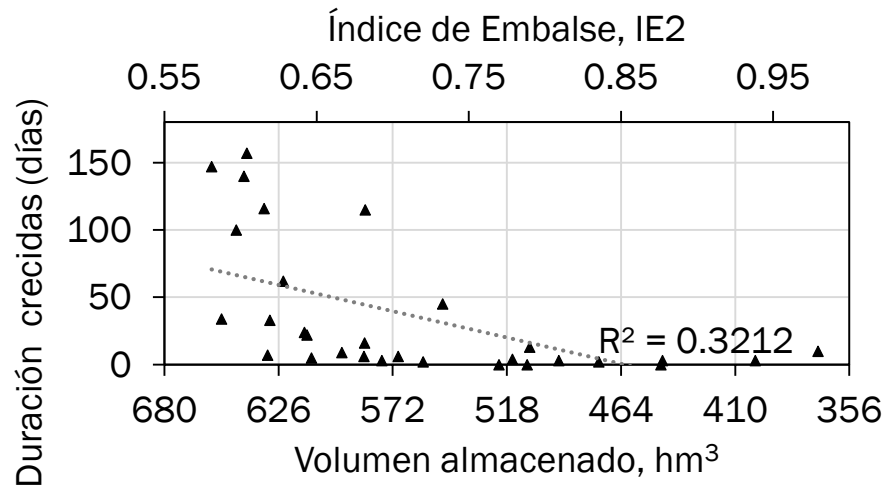
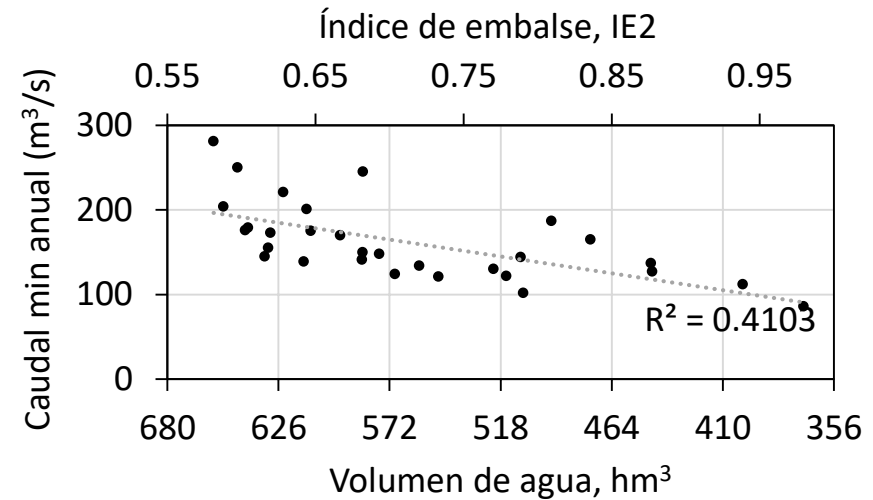
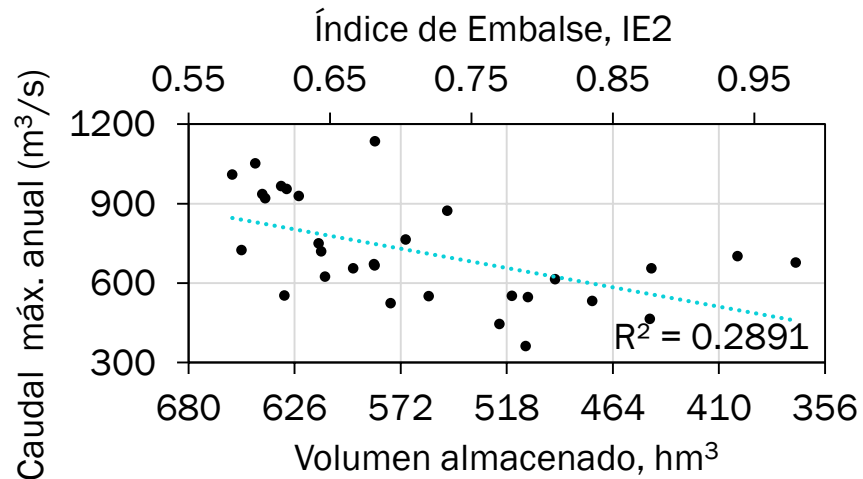
ÍNDICE DE EMBALSE IE2

$$IE2 = \sum_{i=1}^N \frac{A_{Ei}(t)}{A_T} \cdot \frac{C_E(t)}{\overline{Vp_D}(t)}$$

- ▶ $A_{Ei}(t)$: Área de drenaje al embalse en km²,
- ▶ A_T : Área de drenaje a la estación de aforo en km²,
- ▶ $\overline{Vp_D}$: Volumen promedio almacenado en el embalse en Hm³
- ▶ C_E : Capacidad del embalse en Hm³
- ▶ N : Número de embalses aguas arriba de la estación

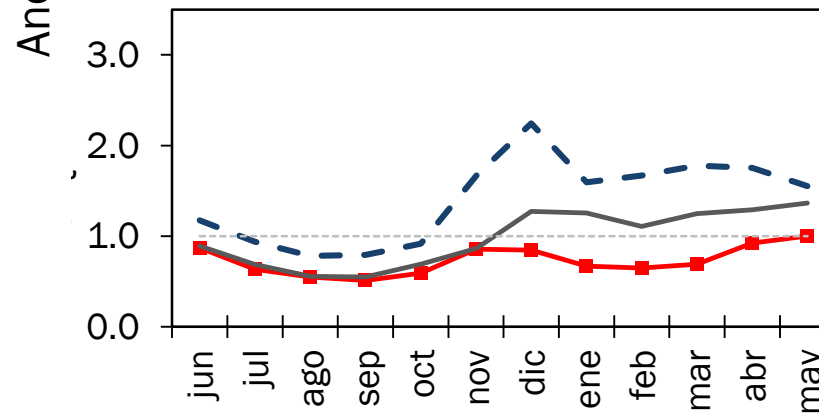
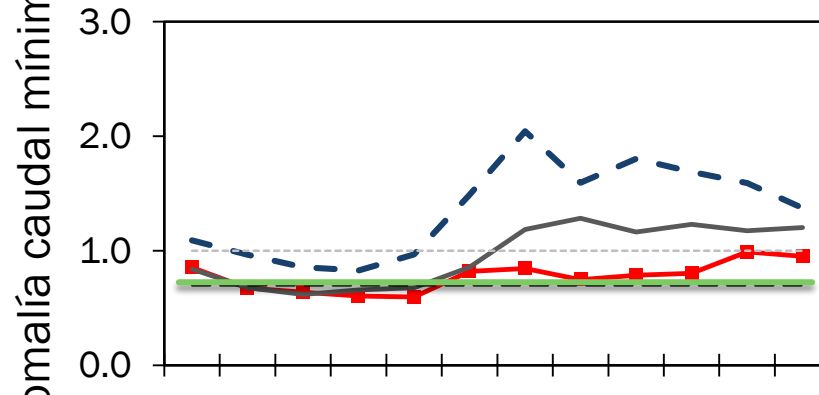
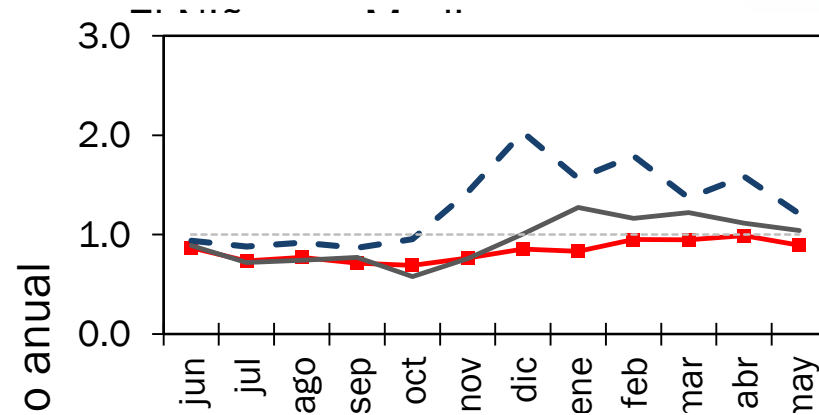
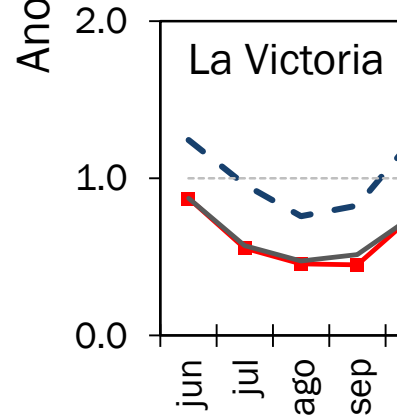
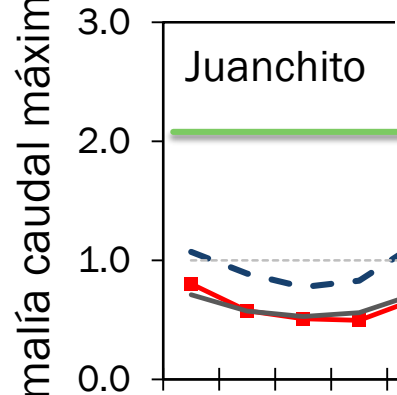
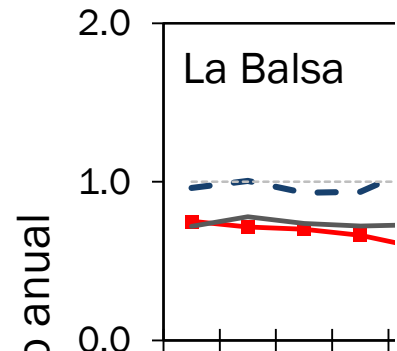


ÍNDICE DE EMBALSE IE2 Y EXTREMOS HIDROLÓGICOS DE JUANCHITO

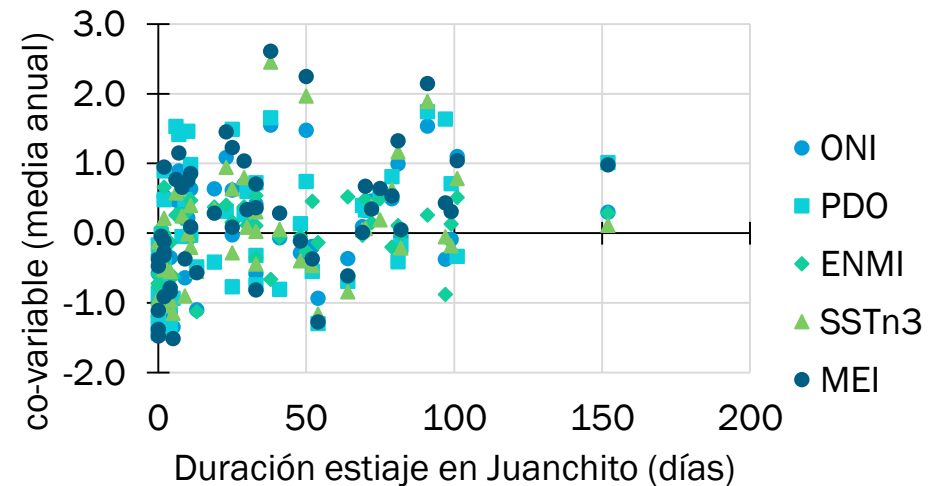
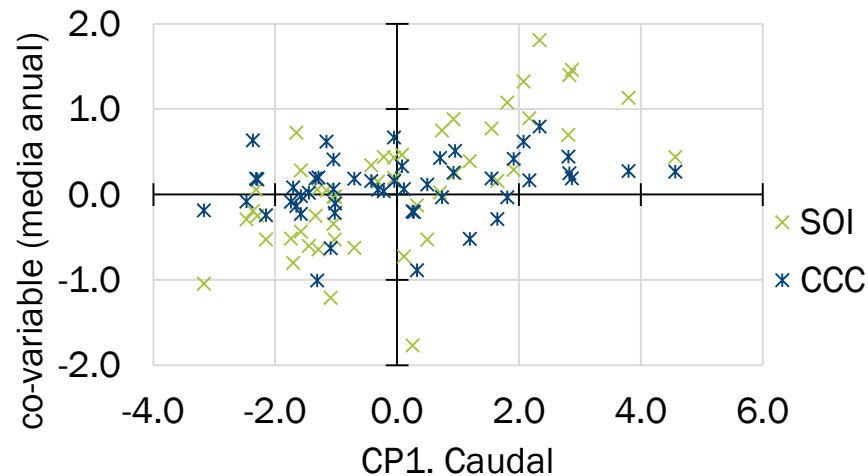
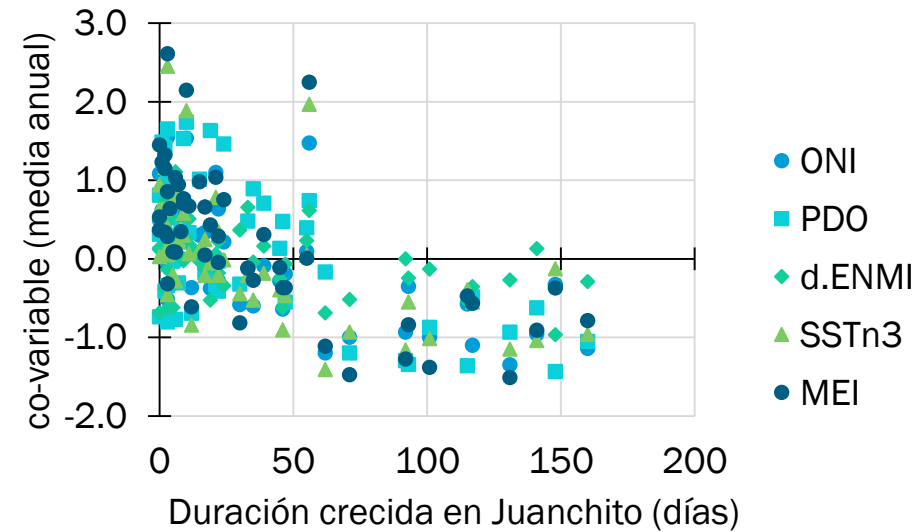
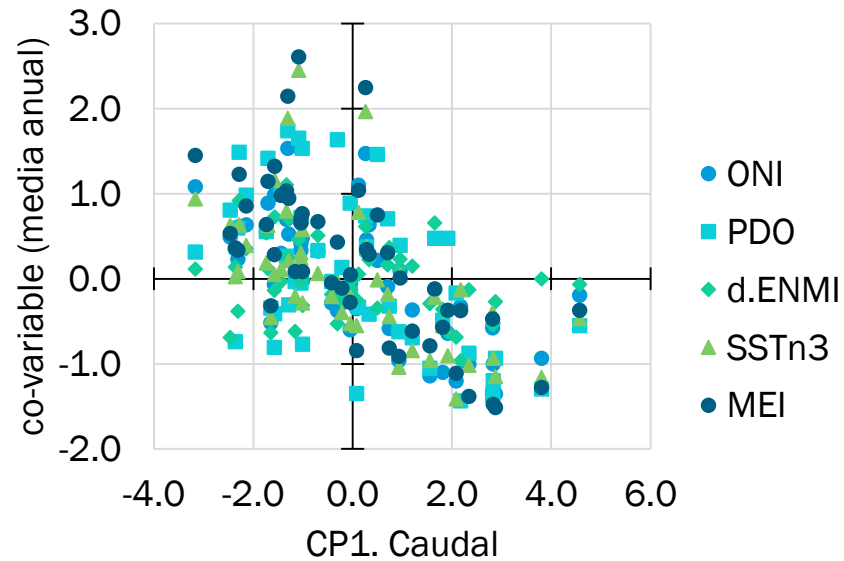


INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

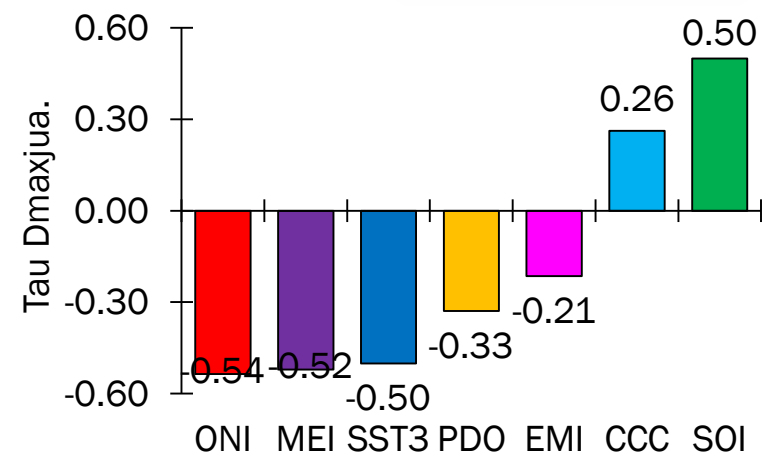
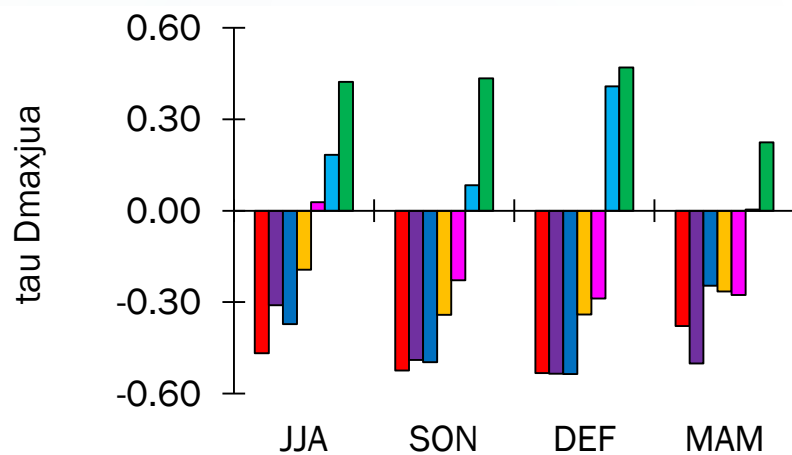
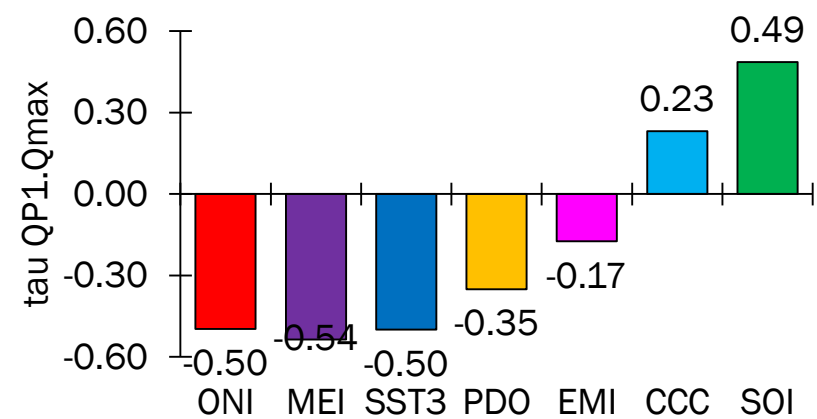
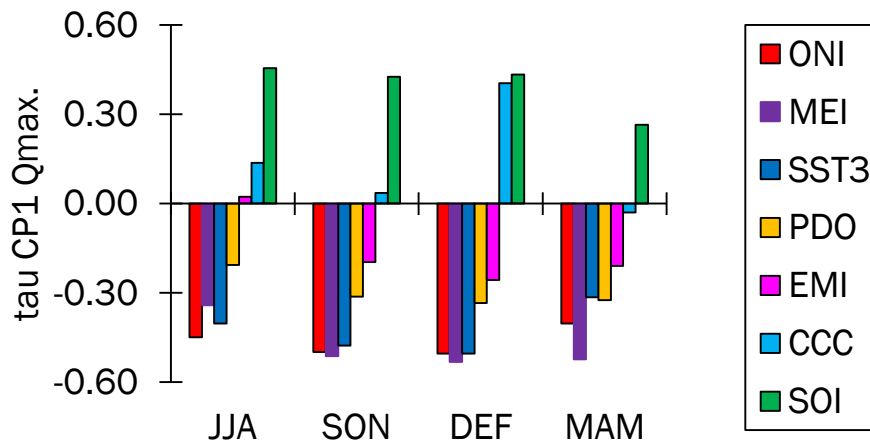
— Normal — La Niña



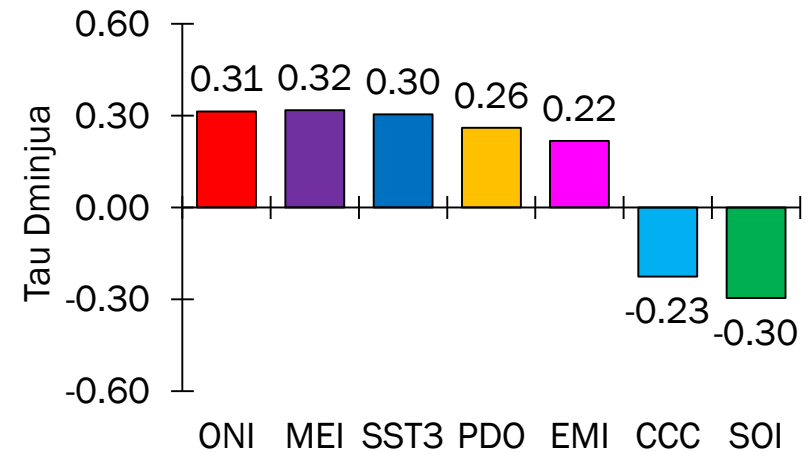
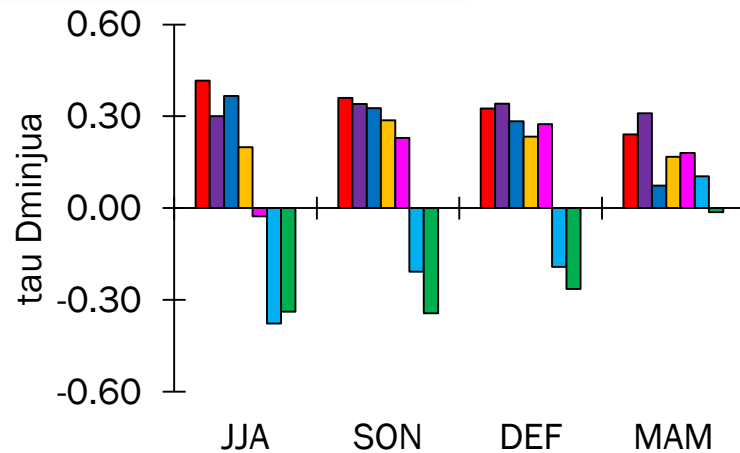
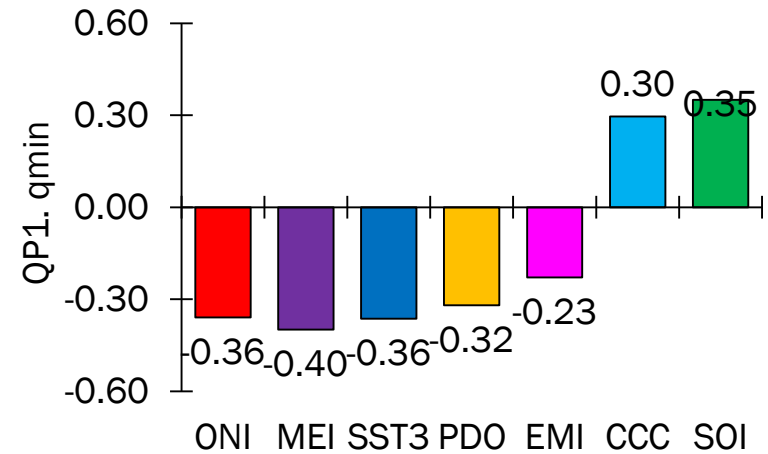
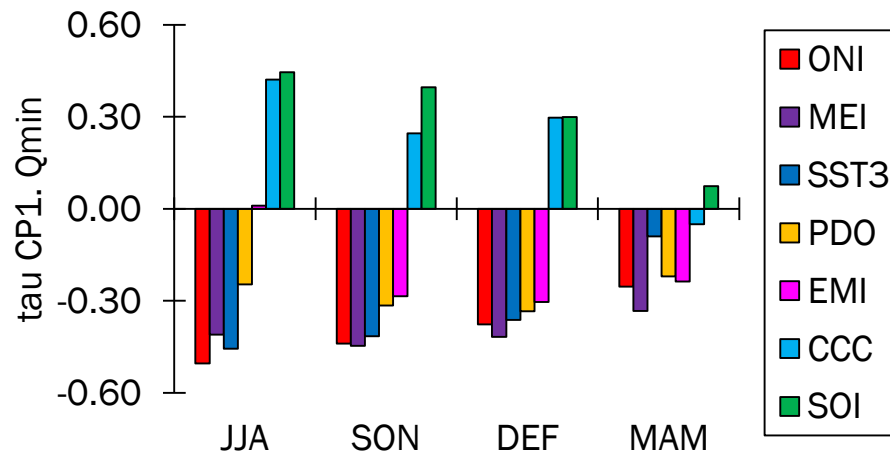
INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA



INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LAS CRECIDAS

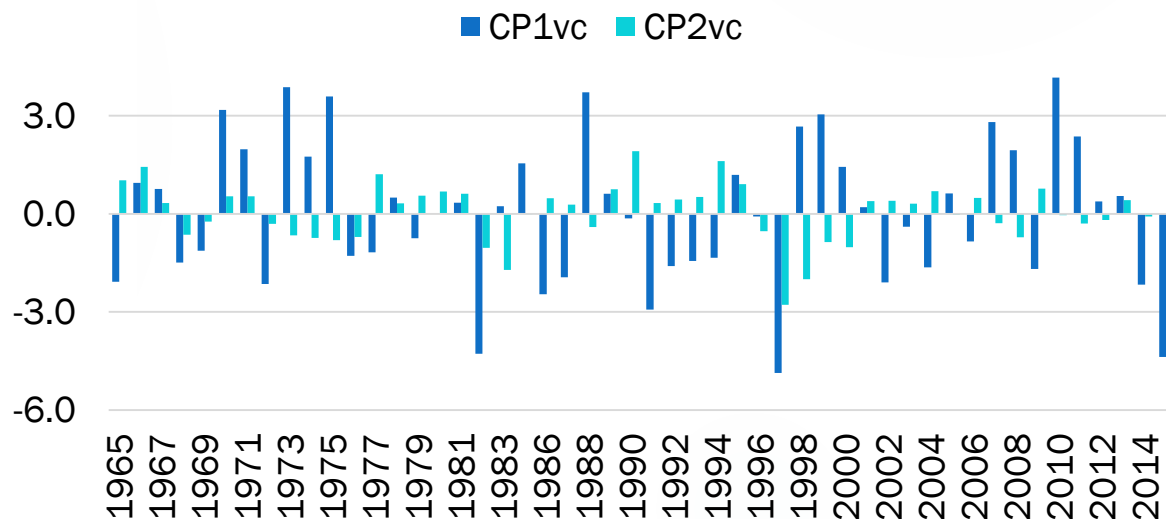
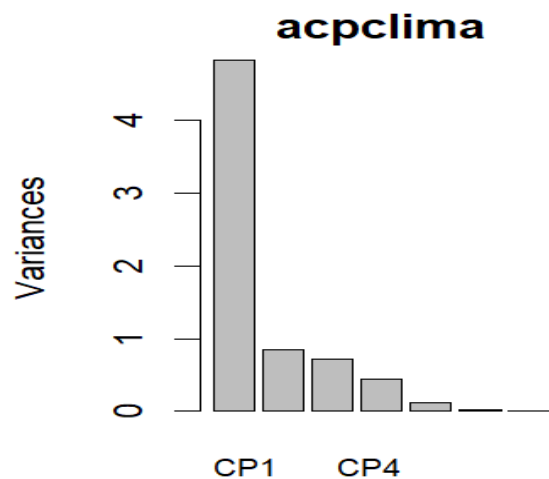
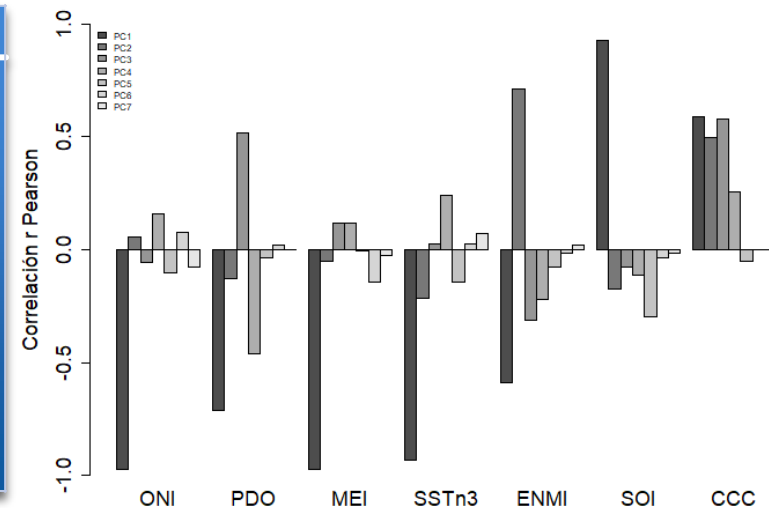


INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL ESTIAJE

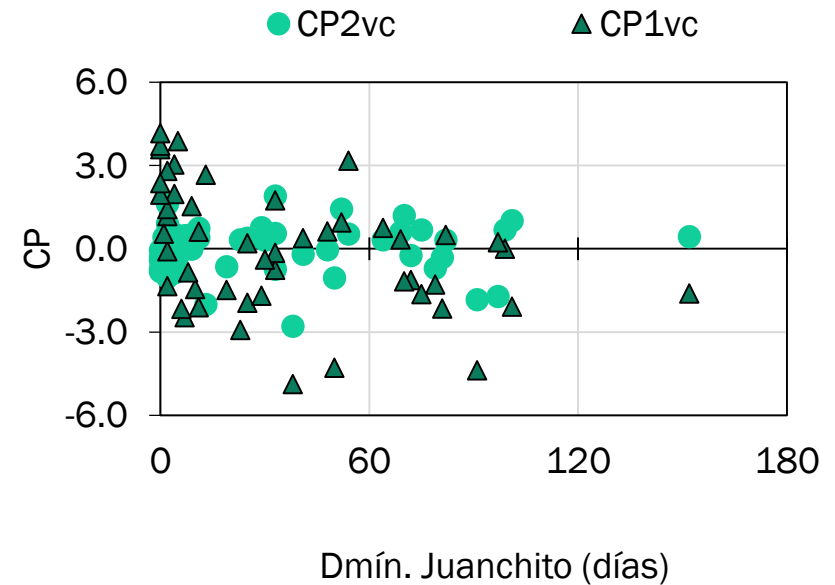
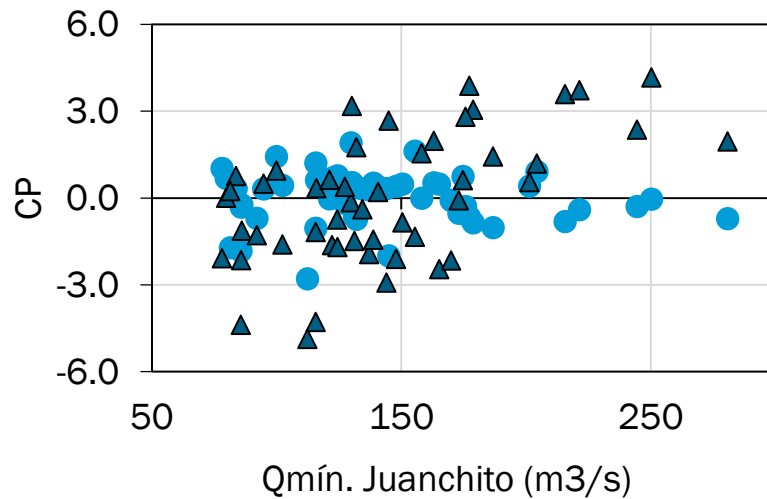
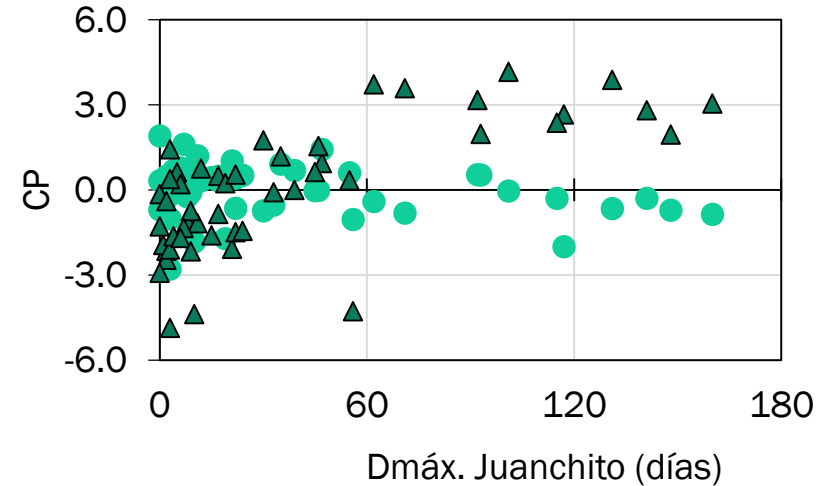
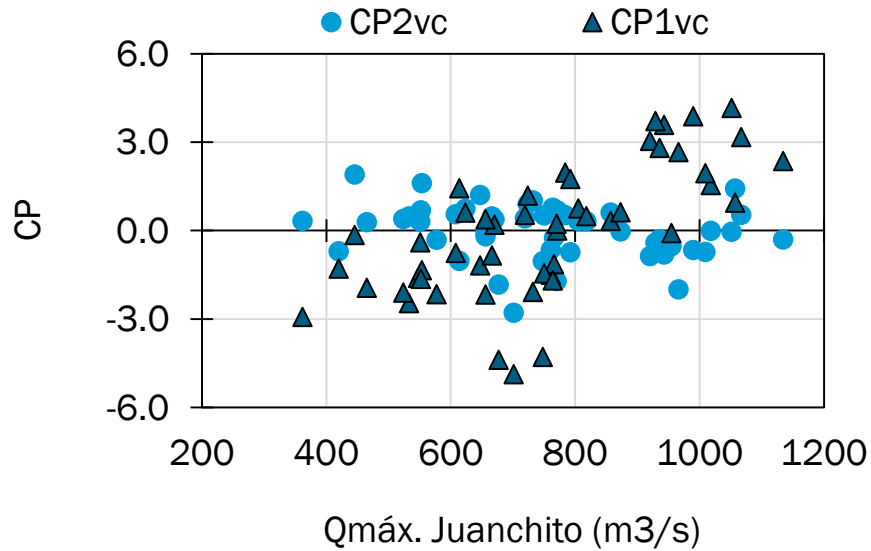


COMPONENTES PRINCIPALES CLIMÁTICAS

r	ONI	PDO	EMI	SSTn3	SOI	CCC	MEI
ONI	1						
PDO	0.59	1					
EMI	0.60	0.27	1				
SSTn3	0.94	0.60	0.34	1			
SOI	-0.90	-0.62	-0.60	-0.82	1		
CCC	-0.53	-0.30	-0.23	-0.57	0.40	1	
MEI	0.95	0.70	0.47	0.95	-0.91	-0.50	1



COMPONENTES PRINCIPALES CLIMÁTICAS Y JUANCHITO



MODELOS ESTADÍSTICOS NO ESTACIONARIOS EN LITERATURA

- ▶ Modelos estacionarios para **ventanas móviles** (Jain & Lall, 2000)
- ▶ Modelos de **tendencia temporal** (El-Adlouni et al., 2007; Lee & Jeong, 2014; Strupczewski et al., 2001)
- ▶ Modelos de **distribuciones mixtas**
 - ▶ Series heterogéneas (Alila & Mtiraoui, 2002; Zeng et al., 2014)
 - ▶ Usando las fases de ENSO (Poveda & Álvarez, 2012; Waylen & Caviedes, 1986).

Modelos de **covariables externas**

- ▶ **Modelos aditivos generalizados – gamlss** (Ahn & Palmer, 2016; Giraldo & García, 2012; López & Francés, 2014; Machado et al., 2015; Villarini et al., 2009, Villarini & Strong, 2014)
- ▶ Índices de Cambio Climático de modelos de escala reducida: (Du et al., 2015; Giraldo & García, 2012; Galiano et al., 2015; Kim et al., 2011)
- ▶ Modelos bayesianos y algoritmos de optimización: (Anjos et al., 2013; Escalante & Garcia, 2014; Lima & Lall, 2011; Sugahara et al., 2009).
- ▶ Modelos multivariados y copulas: (Vittal et al., 2015; Zhang & Singh, 2014; Chebana et al., 2013)

LOS MODELOS ADITIVOS GENERALIZADOS DE LOCALIZACIÓN, ESCALA Y FORMA - GAMLSS

(Rigby & Stasinopoulos, 2005)

$$Y_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, n, \quad \Rightarrow \quad F_Y(y_i | \theta_i), \quad \Rightarrow \quad \theta_i \equiv (\mu_i, \sigma_i, \nu_i, \tau_i)$$

- ▶ Modelos capaces de reproducir variación temporal de los θ_i
- ▶ Cada uno de los parametros θ_i puede tener relación con un conjunto m de variables explicativas $X_t = [x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{mt}]$
- ▶ Basados en

ML: modelos lineales

GML: modelos generalizados

GAM: modelos aditivos generalizados

- ▶ Una función de enlace monotónica $g_k(\cdot)$ permite conectar θ_i y X_t :: (logaritmo o identidad)

$$g_k(\theta_k) = X_k \beta_k + \sum_{j=1}^{m_k} h_{jk}(X)$$

En esta Tesis

- ▶ El modelo es semi-paramétrico
- ▶ La función de suavizado $h(\cdot)$ puede ser: B-splines penalizados $pb(\cdot)$; ó Splines cúbicos $cs(\cdot)$

LOS MODELOS NO ESTACIONARIOS

Serie temporal de extremos hidrológicos

- Caudal, Qmax/Qmin.
- Duración, Dmax/Dmin.

Covariables

- Índices de embalse
- Índices climáticos
- Probabilidad de La Niña

Función de distribución de probabilidad

- Gumbel
- Log normal
- Gama
- Weibull
- Negativa Binomial I

Tipo de tendencia

- 1: Independientes
- l: Lineal
- cs: no lineal
- pb: no lineal

GAMLSS
 $Y_i \sim F(y_i; \theta_i)$

$$Y_i \sim F(y_i; \theta)$$

M0: Modelo estacionario

- Cambios de acuerdo al periodo de análisis

M1: Modelo de tendencia

- El tiempo como término aditivo

$$Y_t \sim F(y_i; \theta_t)$$

$$Y_{m_i} \sim F(y_i; \theta_{m_i})$$

M2: Modelo de distribución mixta

- Probabilidad de eventos ENSO
- m=2 componentes

M3: Modelo de covariable

- Una covariable
- Conjunto de covariables
- Pronósticos

M4: Modelo de covariable

- Componentes principales
- Pronósticos

$$Y_i \sim F(y_i; \theta_i)$$

Selección de modelos

- AIC / SBC / Normalidad e iid de residuales
- Worm-plot / Coeficiente de corr. Filliben

$$GAIC = -2 \cdot \ln(ML) + 2(k \cdot df)$$

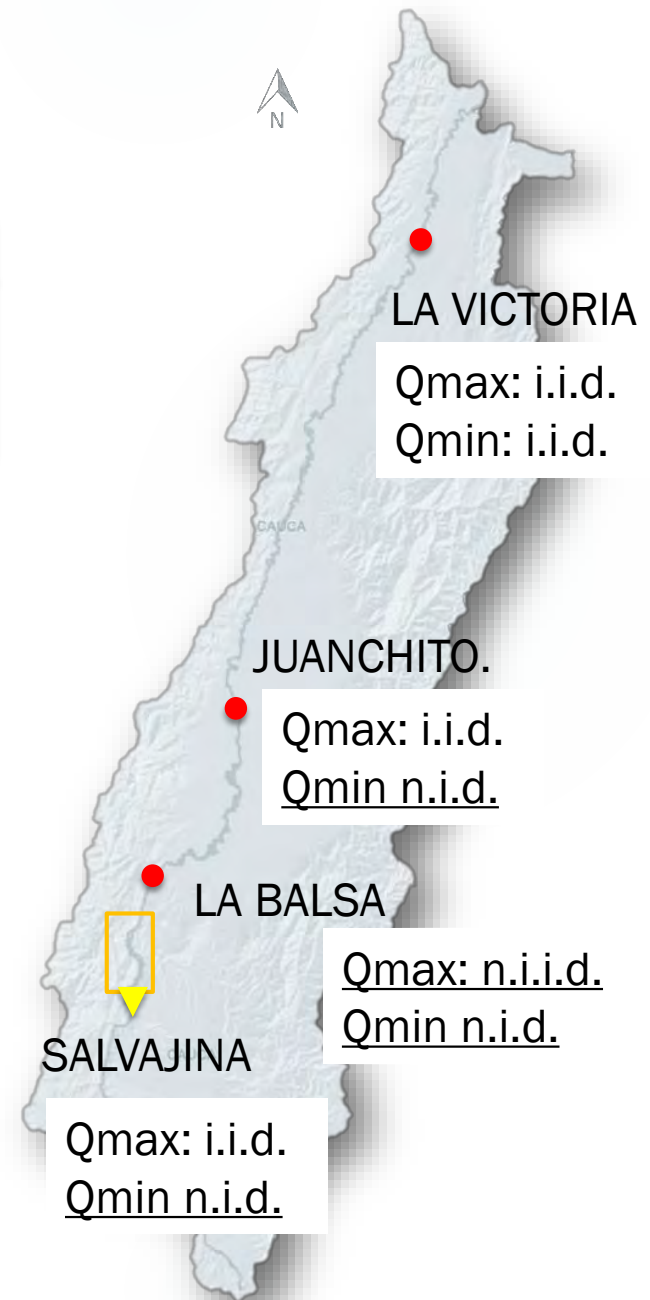
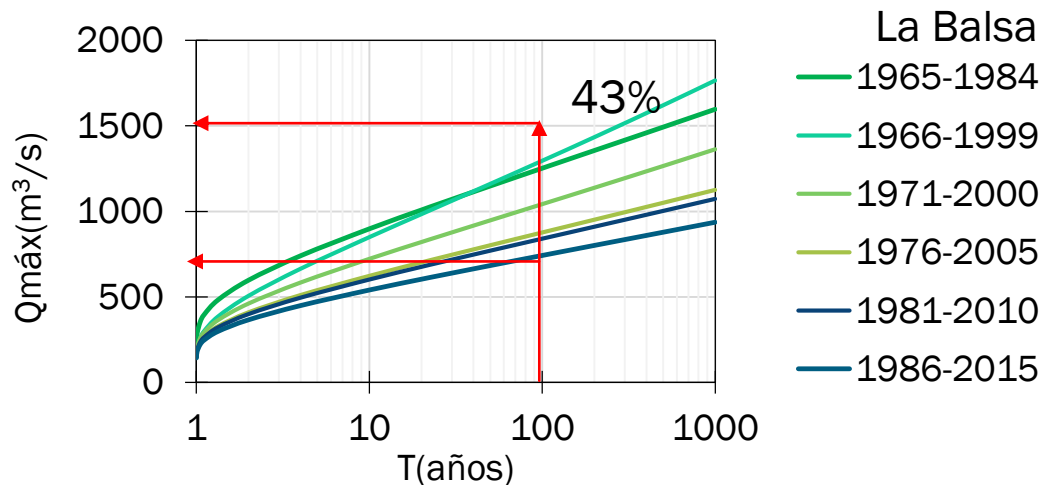
MODELO ESTACIONARIO: M0

Caudal diario máximo anual

Muestra	Salvajina	La Balsa	Juanchito	La Victoria
1965-2015	LN2	LN2	GA	GA
1965-1984	VE I	LN2	WE	GA
1986-2015	LN2	LN2	GA	LN2

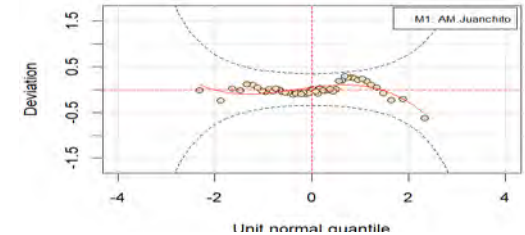
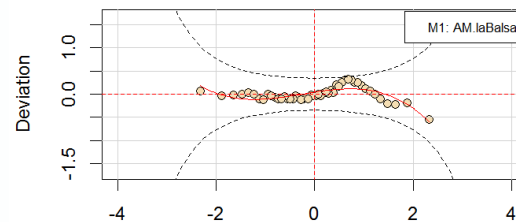
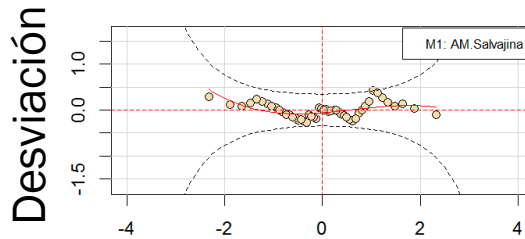
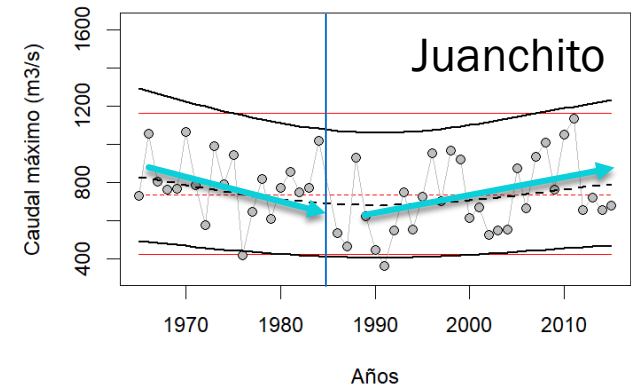
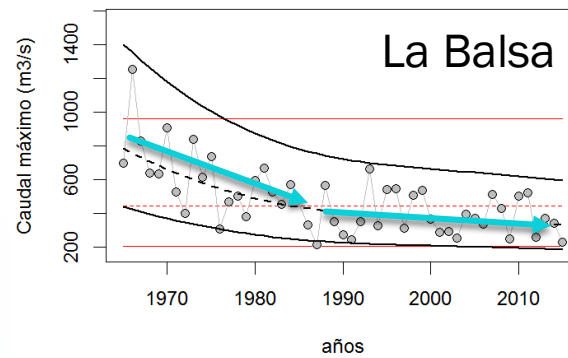
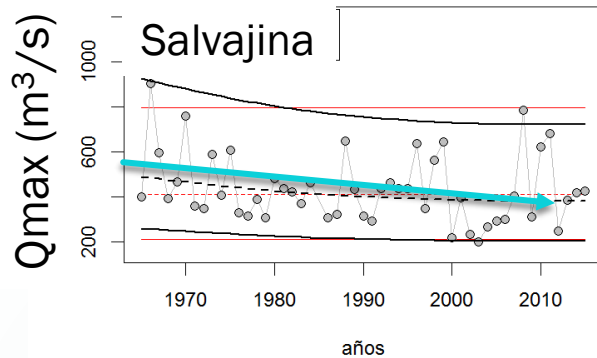
Caudal mensual mínimo anual

Muestra	Salvajina	La Balsa	Juanchito	La Victoria
1965-2015	LN2	GA	LN2	LN2
1965-1984	LN2	LN2	LN2	LN2
1986-2015	LN2	WE	VE I	GA



MODELOS DE TENDENCIA TEMPORAL: M1 PARA CRECIDAS ANUALES

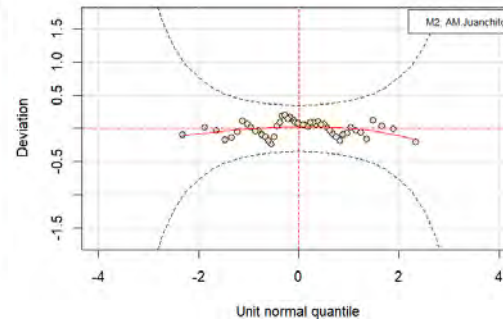
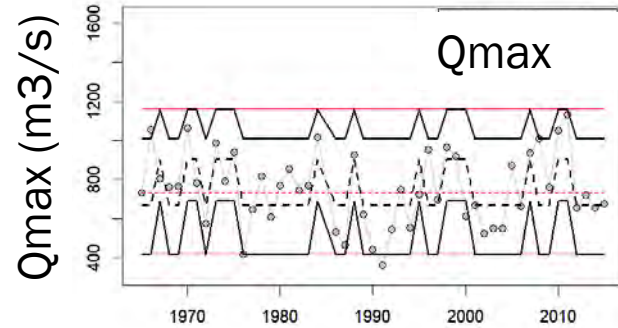
MO — 2.5% — 50% — 97.5% ● observaciones
M1 — — — — ● residuales



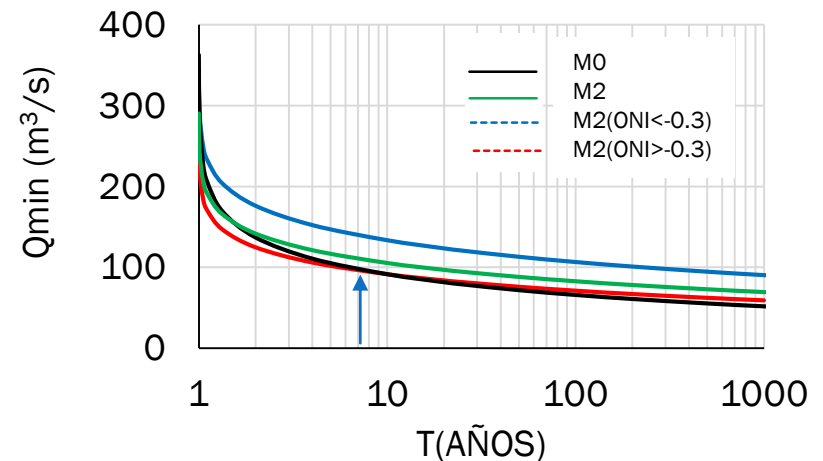
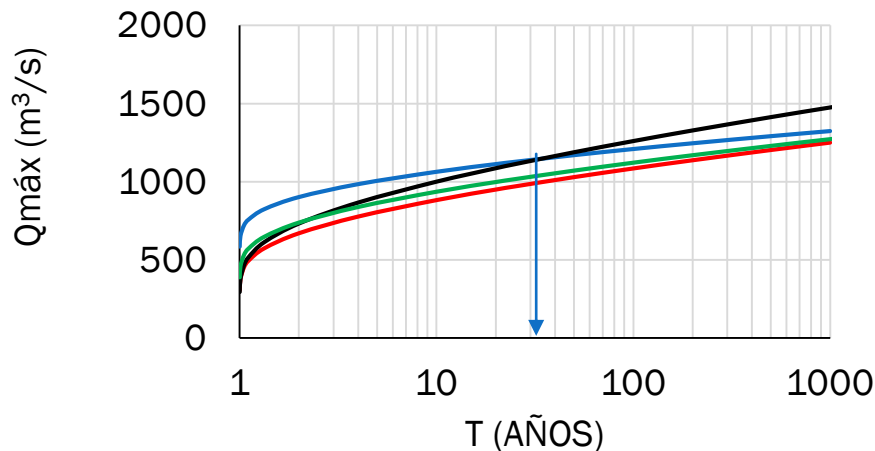
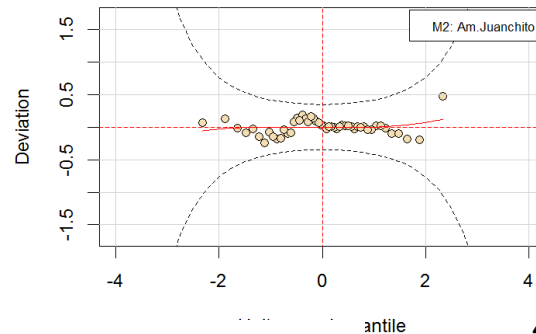
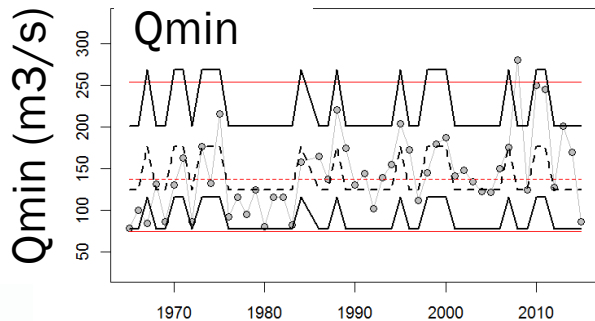
Cuantil normal unitario

- Reflejan las tendencias de las variables (incluso si no existe significancia estadística)
- No linealidades entre los parametros y el tiempo
- Puede señalar desviaciones al supuesto de estacionariedad

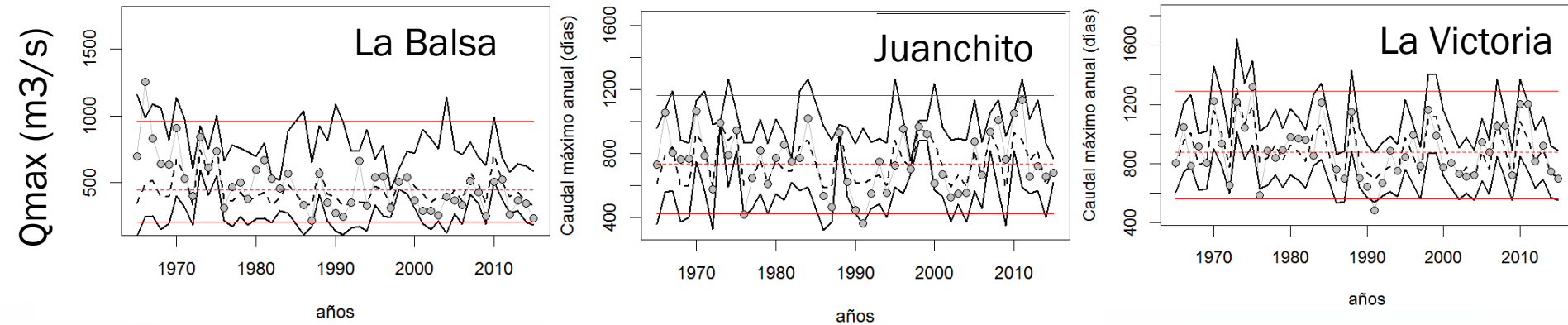
MODELOS DE DISTRIBUCIONES MIXTAS: M2 JUANCHITO



- Aumento en la magnitud en años La Niña
- Disminución en la magnitud en años No Niña
- Los M2 representan la variabilidad de las series
- Los M0, requieren de menos grados de libertad de ajuste
- A partir de cierto cuantil la magnitud de los eventos M2 es menor que M0



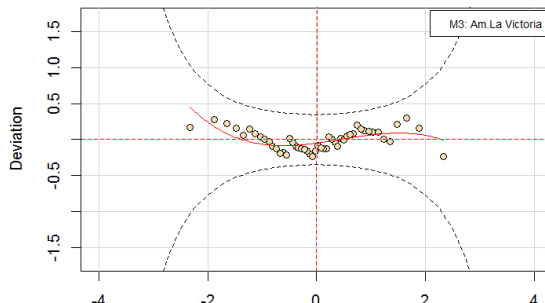
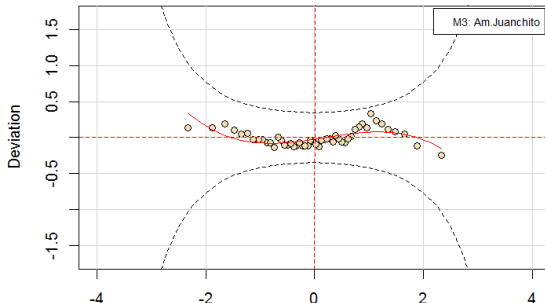
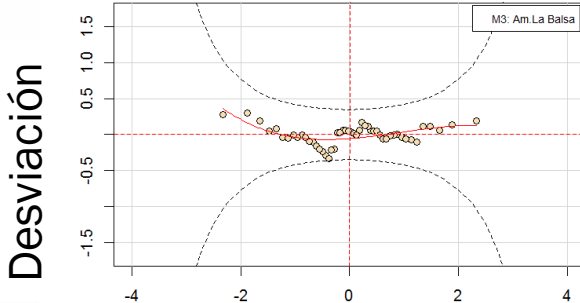
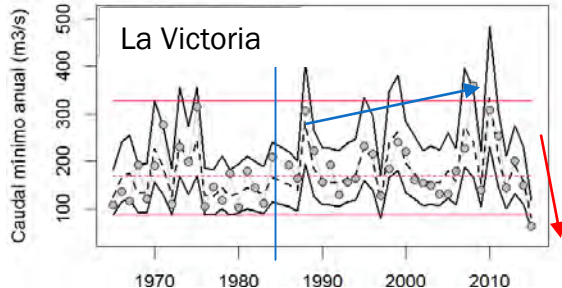
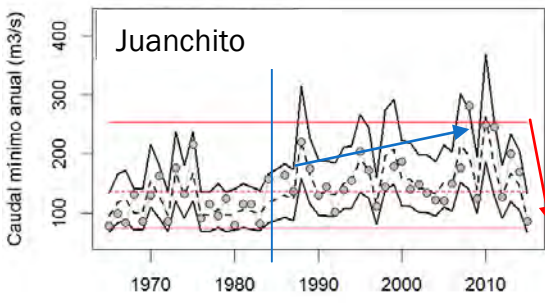
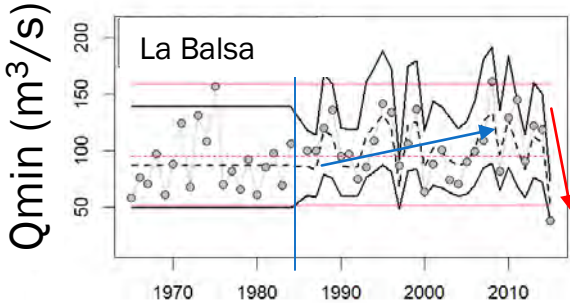
MODELOS DE COVARIABLE: M3 CRECIDAS ANUALES



- IE2 No es significativa en la estación objetivo para el embalse
- MEI y ONI significativos en la mayoría de modelos

Estación	La Balsa		Juanchito		La Victoria	
Modelo	M0	M3	M0	M3	M0	M3
μ	1.00	IE2+cs(MEI)	1.00	pb(ONI)	1.00	pb(IE2)+pb(ONI)
σ	1.00	ONI+SST	1.00	pb(ONI)	1.00	1.00
df	2.00	8.00	2.00	12.09	2.00	6.01
GAIC	662.01	639.47	668.39	621.46	667.60	620.77
Media	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00
Varianza	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
Asimetría	0.22	0.16	-0.26	0.07	0.06	-0.66
Curtosis	2.55	2.73	2.52	2.16	2.59	3.12
Filliben	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98

MODELOS DE COVARIABLE: M3 CAUDALES MÍNIMOS ANUALES



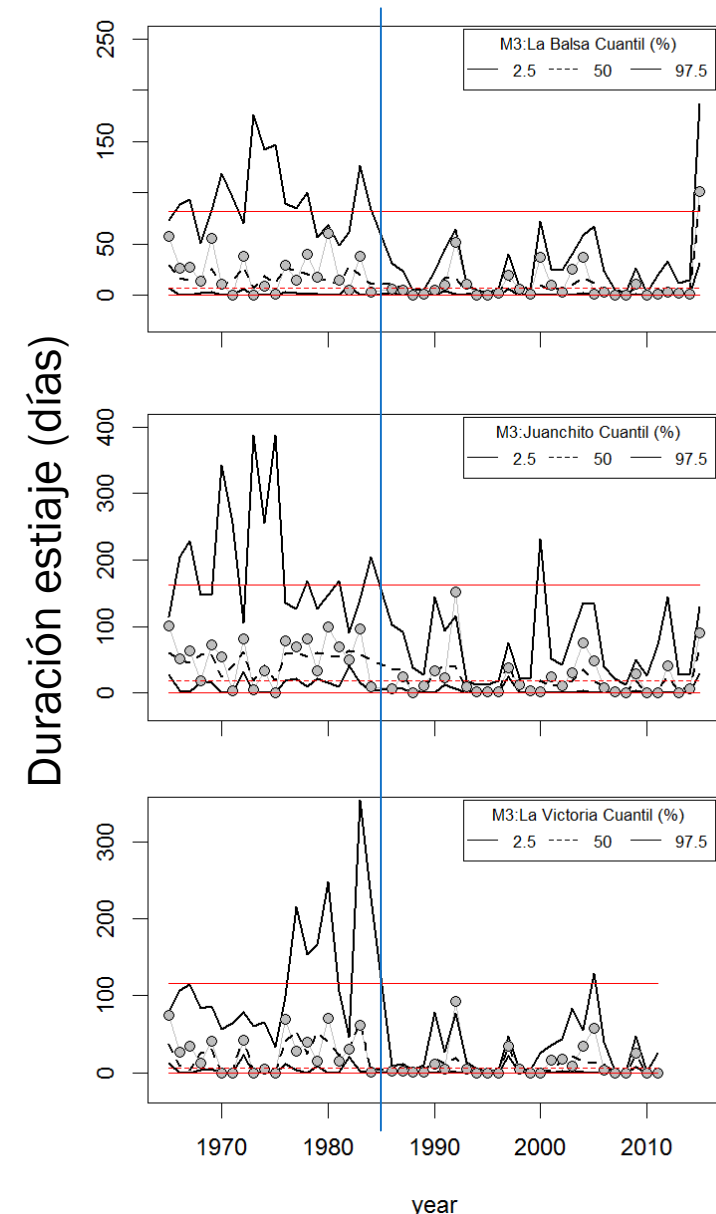
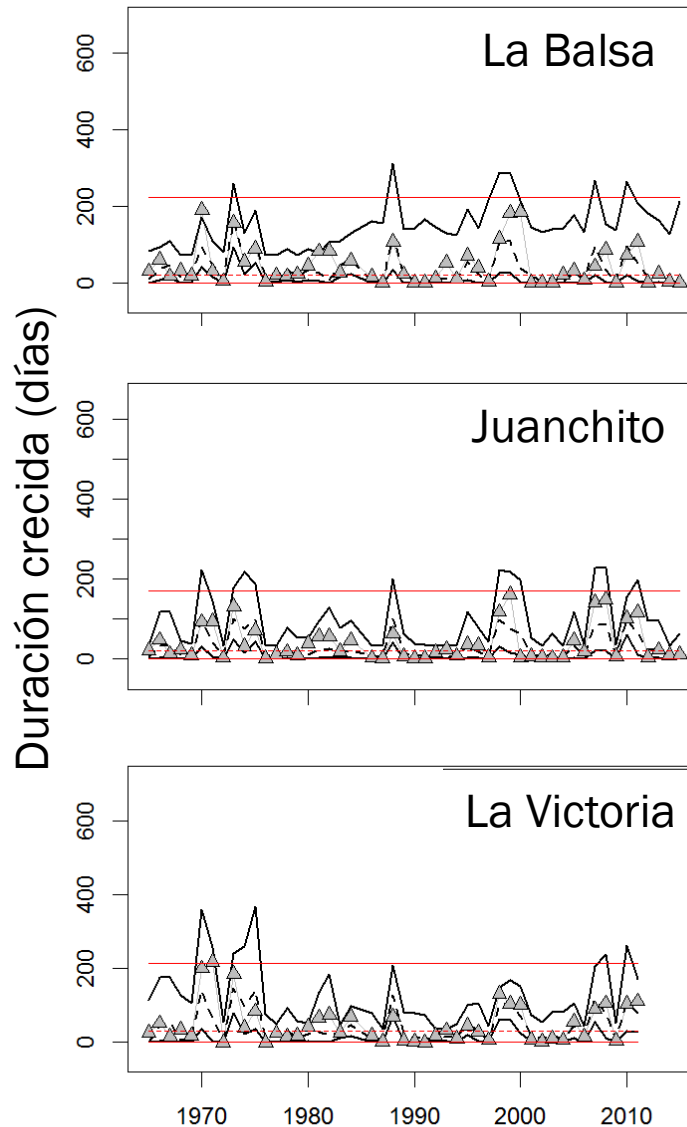
Cuantil normal unitario

- IE2 y MEI significativos en todos los modelos

Estación	La Balsa		Juanchito		La Victoria	
Modelo	M0	M3	M0	M3	M0	M3
μ	1.00	cs(IE2)	1.00	cs(IE2)+cs(MEI)	1.00	cs(MEI)+cs(IE2)
σ	1.00	IE2	1.00	1.00	1.00	1.00
df	2.00	7.00	2.00	10.00	2.00	10.00
GAIC	475.51	454.58	524.46	478.48	550.37	508.48
Filliben	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

MODELOS DE COVARIABLE: M3 DURACIÓN DE CRECIDAS Y ESTIAJES

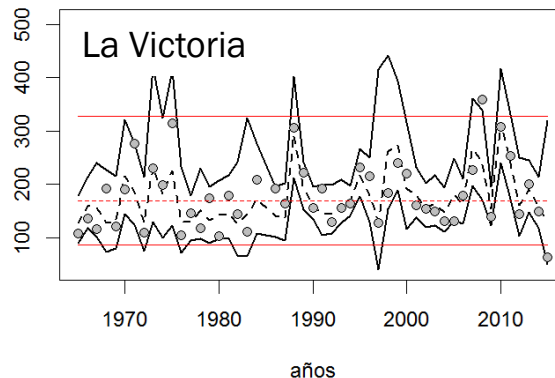
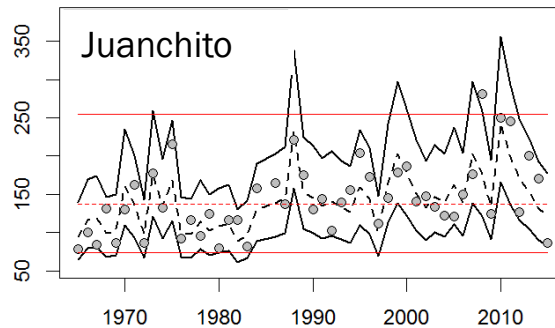
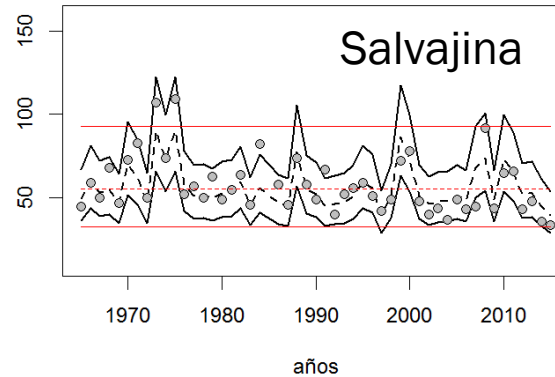
- ▶ **IE2**
Significativo
en duración
de eventos
- ▶ **Alta**
variabilidad
en los
cuantiles
asociada a
las Fases
extremas de
ENSO
- ▶ **Dependencia**
no lineal
asociada a
pb() y cs()



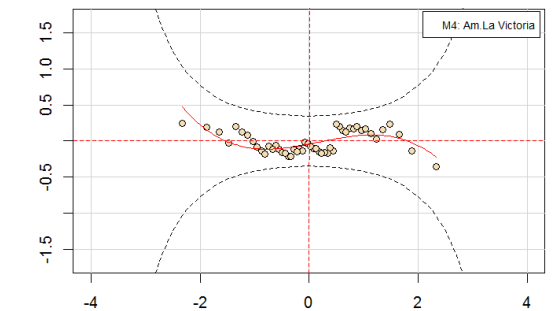
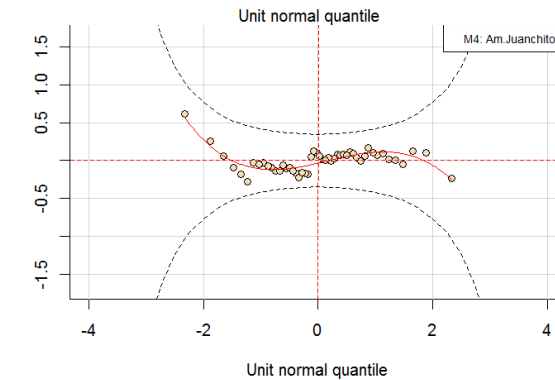
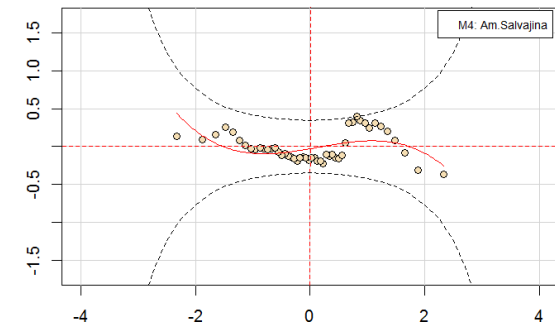
MODELOS DE COMPONENTES PRINCIPALES: M4 CAUDALES MÍNIMOS ANUALES

- ▶ El conjunto clima-embalse como variables explicativas para régimen alterado
- ▶ CP1 significativa en todos los modelos
- ▶ CP2 en los modelos de mínimos
- ▶ No linealidad usando suavizado pb()
- ▶ **Modelo no adecuado para parametrizar algunas variables**

Caudal mínimo anual (m^3/s)



Desviación



Cuantil normal unitario

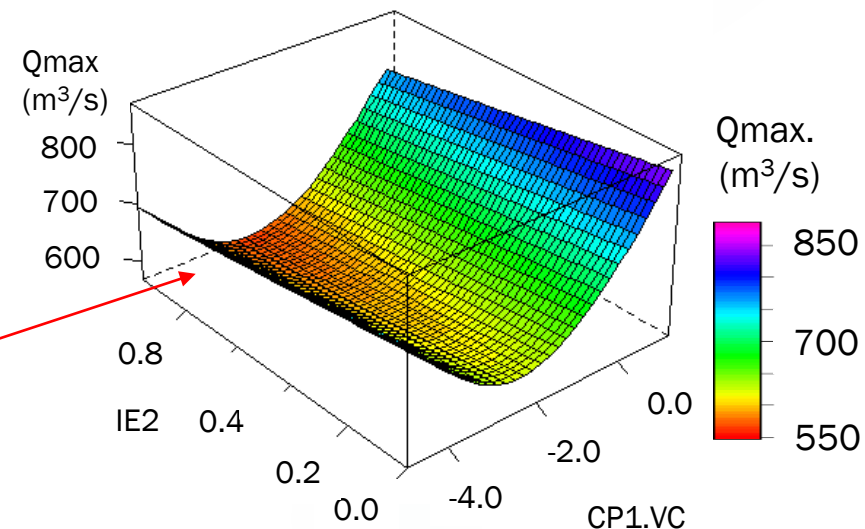
COMPARACIÓN DE MODELOS DE CAUDAL MAXIMO Y MÍNIMO



- ▶ Modelos M2 adecuados para las crecidas en Juanchito y La Victoria y los estiajes en Salvajina, La Balsa y Juanchito
- ▶ Modelos M3 se ajustan a ambos extremos hidrológicos en Salvajina, las crecidas de La Balsa y los caudales mínimos en La Balsa, Juanchito y La Victoria
- ▶ Modelos M4 de buena calidad para las crecidas en Salvajina y Juanchito, y los caudales mínimos en La Victoria

Modelo no estacionario

Estación	Qmáx.	Qmín.
Salvajina	M4	M2
La Balsa	M3	M3
Juanchito	M4	M4
La Victoria	M2	M3



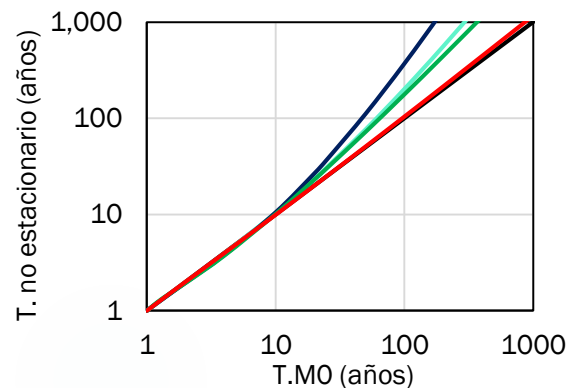
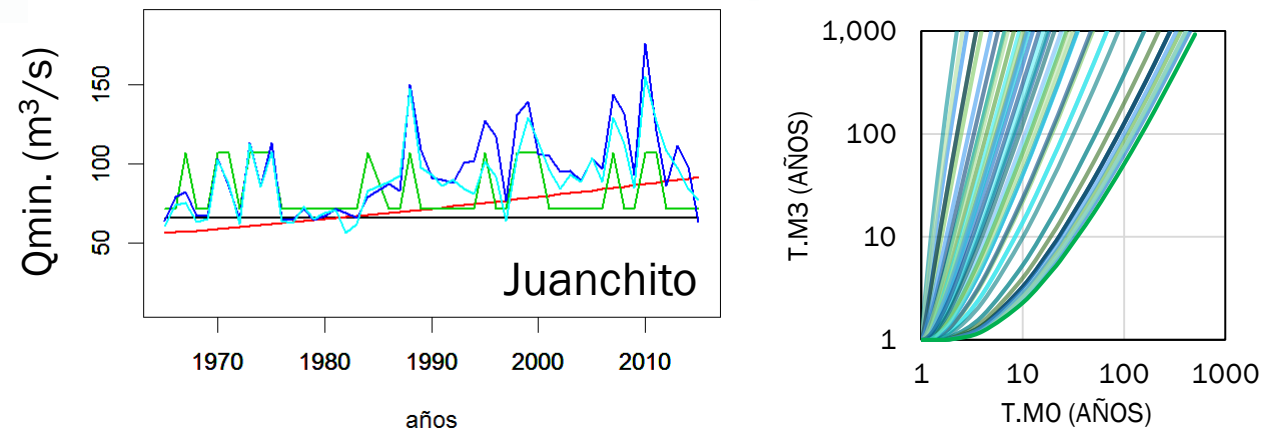
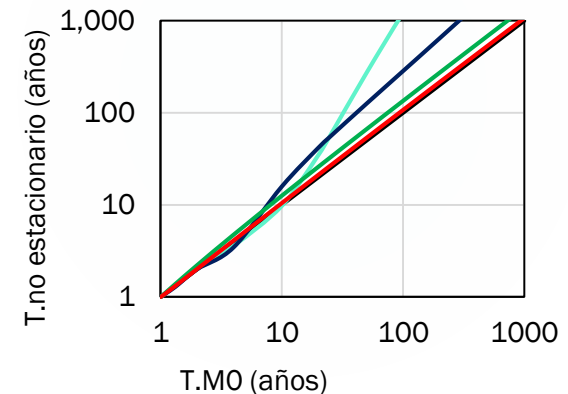
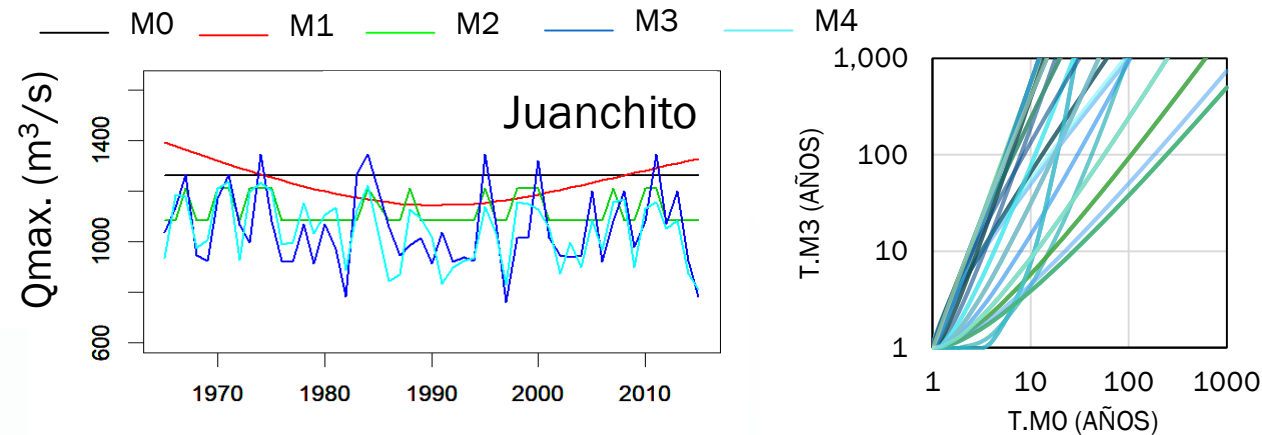
COMPARACIÓN DE MODELOS: JUANCHITO

- Cambios en la magnitud de un evento asociado a una probabilidad o T 100 años
- Tendencias de disminución de los caudales de crecida y de aumento de los caudales de estiaje, producen un aumento en T no estacionario

$$T_i = \frac{1}{p_i} = \frac{1}{1 - F_Y(Y_{p_0}, \theta_i)_i}$$

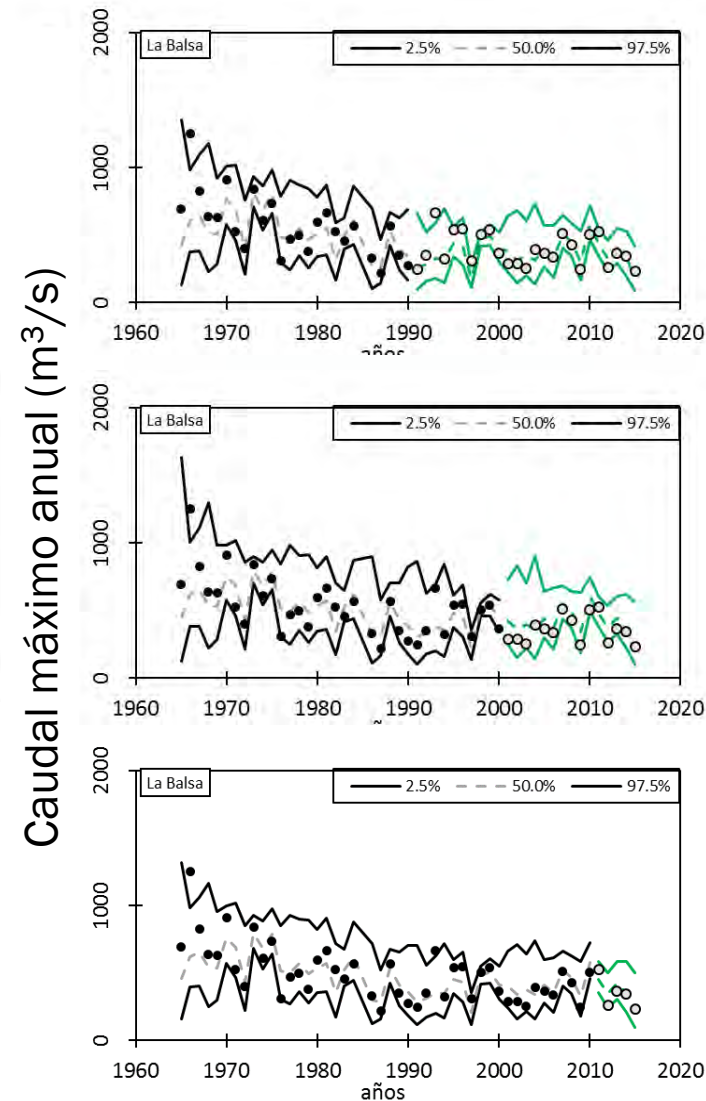
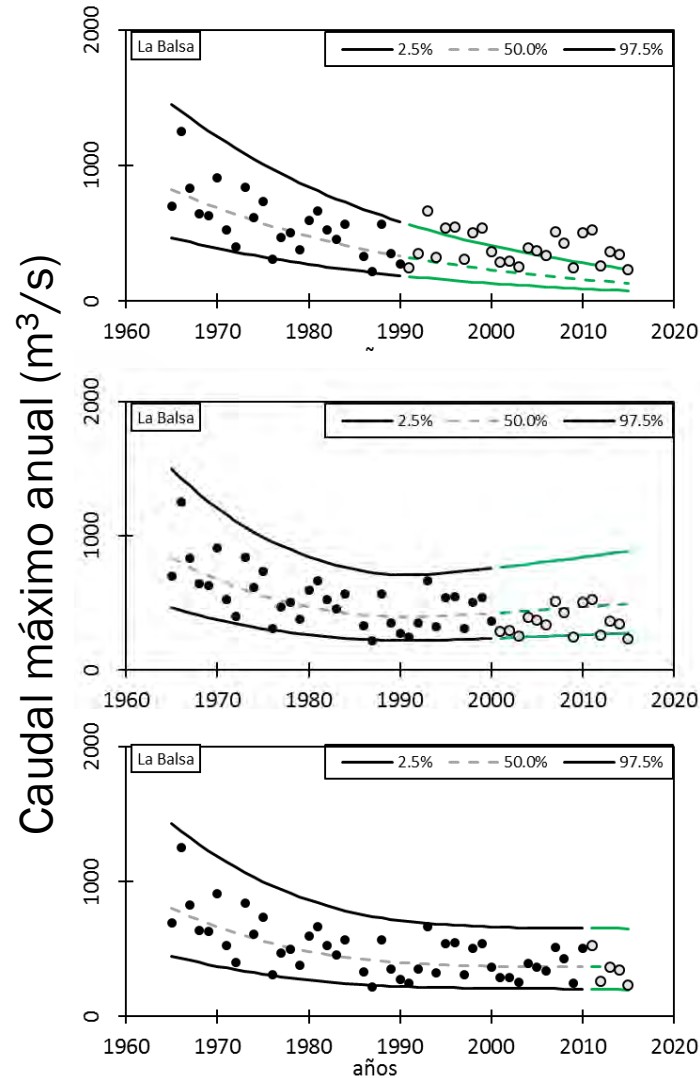
Serinaldi (2015);
Obeysekera & Salas (2016);
Du et al. (2015)

— 1:1 — M4 — M3 — M2 — M1



COMPARACION DE MODELOS DE PRONÓSTICO CRECIDAS: LA BALSA

- Los modelos M1 presentan baja capacidad de ajustarse a cambios en la variabilidad de la serie
- Alto poder predictivo de los M3 de covariables climáticas y de embalse para representar los cambios de los caudales extremos



CONCLUSIONES

*Del análisis de la no estacionariedad de los índices hidrológicos
¿Cuál es la influencia del embalse y de la variabilidad climática
en los extremos hidrológicos?*

- ▶ Las variables hidrológicas presentan tendencias y cambios en la media asociados a la variabilidad climática y a la alteración antrópica.
- ▶ La gestión de volúmenes en el embalse no parece afectar significativamente la magnitud y duración de las crecidas en Juanchito, pero es relevante para representar la variabilidad de los caudales mínimos en todas las estaciones en régimen alterado.

CONCLUSIONES

Sobre los modelos no estacionarios, incorporando la influencia de ENSO y de la alteración antrópica en el análisis de crecidas, estiajes y su duración.

- ▶ Las distribuciones Lognormal y Gamma describen las crecidas y estiajes en el área de estudio. La distribución Negativa Binomial Tipo I describe adecuadamente su duración.
- ▶ Los modelos gamlss de covariables externas producen una adecuada interpretación de los registros y una predicción significativa de la amenaza de inundaciones y sequías en el área de estudio,
 - ▶ *En la actualidad no poseemos predicciones para todos los índices climáticos*
- ▶ Oportunidad para ajustar la regla de operación frente a condiciones de variabilidad climática extrema, proponer acciones para la gestión integrada de los recursos hídricos
- ▶ El índice de embalse puede incluir otra información relevante y a otra escala de análisis puede ser útil para la gestión del embalse; sin embargo es necesario simplificar su interpretación

CONCLUSIONES

De la comparación de modelos ¿Cuál es el conjunto de variables explicativas adecuado para representar el comportamiento de los caudales extremos en el tiempo?

- ▶ **La principal diferencia entre los modelos no estacionarios está en los criterios de selección de términos aditivos significativos, puede implicar cierta subjetividad**
- ▶ **Una baja capacidad de gamlss para acotar el número de términos aditivos involucrados, cuando se incorporan simultáneamente todos los índices climáticos y de embalse; y para para realizar pronósticos en modelos con suavizado con más de un término aditivo**
- ▶ **Los índices MEI, ONI e IE2 son los más significativos para modelos de covariable, y la CP1 y CP2 climáticas son útiles en el análisis de estiajes. Mientras que la probabilidad de ocurrencia de La Niña es adecuada en la modelación de las crecidas en Juanchito**
- ▶ **B-splines penalizados, puede afectar la calidad de los modelos al reducir excesivamente los grados de libertad extras de ajuste. Mientras, Splines cúbicos los aumenta con riesgo de sobreparametrización**

CONCLUSIONES

¿El diseño de las obras bajo la hipótesis de estacionariedad , es correcto en la actualidad?

DEPENDENDE

- ▶ ¿Existen señales de persistencia, no estacionariedad o de modificación del régimen hidrológico?
- ▶ ¿Es necesario evaluar escenarios de variabilidad climática o alteración antrópica?

Si existen desviaciones al supuesto de estacionariedad, la modelación estadística no estacionaria es una herramienta de análisis interesante. Resaltar los cambios en el riesgo hidrológico y comparar resultados con métodos estacionarios es útil en la toma de decisiones

Es necesario un análisis hidrológico amplio con datos suficientes que incorpore información adicional y valorar la incertidumbre

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Modelar la no estacionariedad a otro tipo de escala temporal/espacial y aprovechar la conexión con índices climáticos con rezago y las proyecciones a corto plazo sobre ENSO

Incorporar otras covariables p.ej.: índices de precipitación extrema, humedad en el suelo, alteración de la cobertura vegetal, tendencias en sequías meteorológicas, la influencia de los cambios de uso del suelo, etc.

Incluir la incertidumbre asociada de cara a la toma de decisiones

Adaptar los nuevos métodos no estacionarios para su aplicación práctica en el diseño hidrológico

Publicaciones

En congreso internacional

- ▶ Sedano, K., Carvajal, Y., López, J., & Francés, F. "Predicting the frequency and magnitude of annual floods in the upper Cauca River based on climatic and reservoir operation indices". ID 243838. American Society of Civil Engineers – World Environmental and Water Resources Congress. Sacramento, USA. 2017. Presentación oral
- ▶ Sedano, K., Carvajal, Y., López, J., & Francés, F. "Predicting the low flows of the upper Cauca River based on reservoir operation and ENSO indices". ID 243845. American Society of Civil Engineers – World Environmental and Water Resources Congress. Sacramento, USA. 2017. Presentación oral
- ▶ Sedano, K., Francés, F., Carvajal, Y., & López, J., "Flood and low flow: non-stationary frequency analysis in Cauca River, Colombia. 7th STAHY International Workshop on Statistical Hydrology. Quebec, Canadá. 2016. Poster

En revista científica

- ▶ Sedano, K., Carvajal, Y., & Ávila, A. "Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia". Revista Luna Azul. ISSN: 1909-2474. Bogotá, Colombia. 2013. Artículo.
 - ▶ *En edición para Ribagua: Modelación no estacionaria de la magnitud y frecuencia de las inundaciones en el Alto Cauca mediante índices climáticos y de operación de embalse. (Sedano, K., Carvajal, Y., López, J., & Francés, F)*
 - ▶ *En edición para Journal of Hydrology: Predicting the low flows of the Upper Cauca River based on reservoir operation and ENSO indices. (Sedano, K., Carvajal, Y., López, J., & Francés, F)*



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



¡Muchas gracias!

Agradecimientos:

**Programa de becas Francisco José de Caldas de Colciencias
convocatorio 497. Corporación Autónoma Regional del Valle del
Cauca – CVC. Proyecto Español de Investigación TETISMED
(CGL2014-58127-C3-3-R).**

Grupos de investigación involucrados:

**GIMHA (Universitat Politècnica de València). Universidad de Colima
– México. IREHISA y CINARA (Universidad del Valle - Colombia).**



Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental





UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE
PROGRAMA DE DOCTORADO EN
INGENIERÍA DEL AGUA Y
MEDIOAMBIENTAL



iiama
Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y FACTORES ANTRÓPICOS EN LOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA, COLOMBIA

Tesis Doctoral

Autora:

Ruth Karime Sedano Cruz

(karimesedano@gmail.com / rutsecru@posgrado.upv.es)

Directores:

Dr. Félix Francés García, Dr. Yesid Carvajal Escobar, y Dr. Jesús López de la Cruz

Valencia. Septiembre, 2017.



Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental

