



Universidad Nacional  
de La Plata



Facultad de Ciencias  
Agrarias y Forestales

# EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA HIDROLÓGICA DE FORESTACIONES EN LA LLANURA PAMPEANA

DOCTORANDO:

ING. FTAL. SEBASTIÁN I. BESTEIRO (UNLP-CONICET)

DIRECTOR:

DRA. FERNANDA J. GASPARI (UNLP)

CODIRECTOR:

DR. EDUARDO E. KRUSE (UNLP-CONICET)

# Organización de la tesis

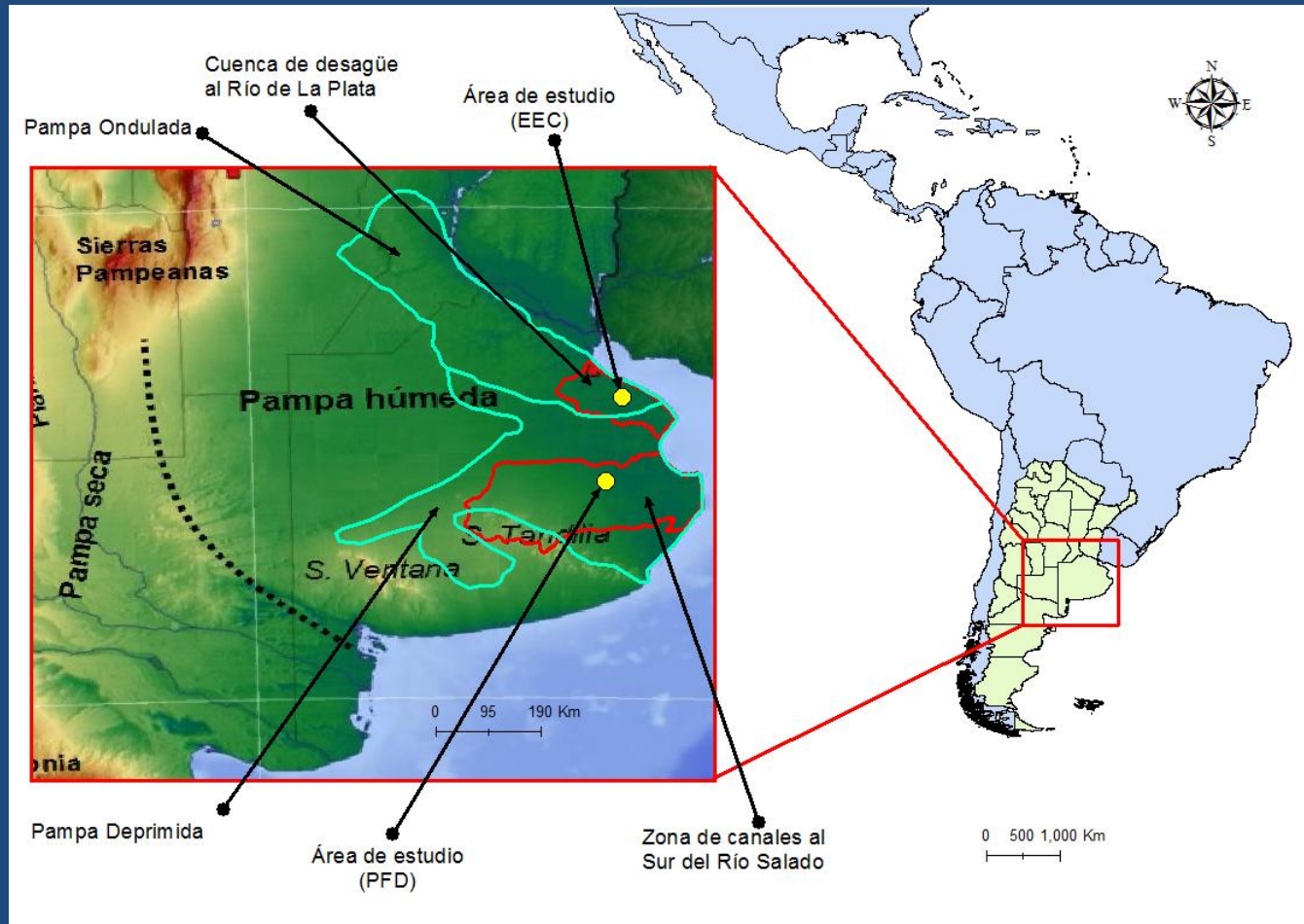
- **Capítulo 1.** Introducción
- **Capítulo 2.** Intercepción de las precipitaciones
- **Capítulo 3.** Escurrimiento superficial
- **Capítulo 4.** Infiltración y aguas subterráneas
- **Capítulo 5.** Evapotranspiración
- **Capítulo 6.** Consideraciones finales
- **Capítulo 7.** Conclusiones

# Objetivo principal

Evaluar la influencia hidrológica de forestaciones de rápido crecimiento en dos localidades de la llanura pampeana, como base para reconocer pautas de manejo del agua en ambientes de llanura.

# 1. Introducción

## Área de estudio



## 2. Intercepción de las precipitaciones

Analizar la redistribución de las precipitaciones bajo plantaciones forestales adultas de *Pinus radiata* Don, *Eucalyptus viminalis* Labill y *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh en los dos predios de la llanura pampeana.

La elevada capacidad de intercepción que caracteriza a las forestaciones, se manifiesta con mayor intensidad en los rodales de pino frente a los de eucalipto y, a su vez, aumenta en relación directa con la densidad de los rodales de este último genero.

# 2. Intercepción de las precipitaciones

## Estación El Centauro (EEC)

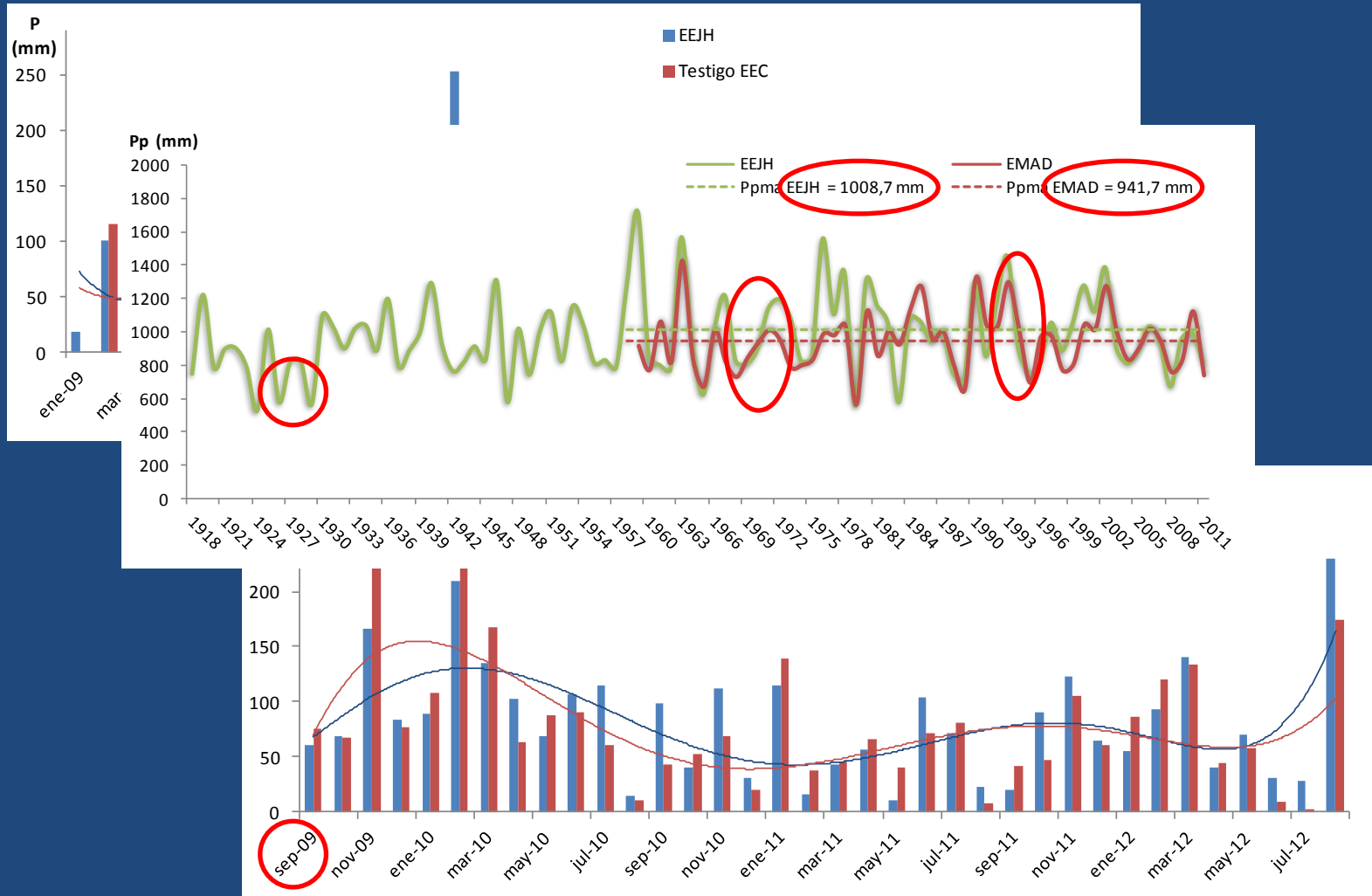


## Predio Forestal Dolores (PFD)



Nombre	Lugar	Cercanía	Latitud	Longitud	Período	Datos
Experimental Hirschhorn	EEC	8km	-34° 59,1'	-57° 59,8'	1998-2011	Diarios
Experimental Hirschhorn	EEC	8km	-34° 59,1'	-57° 59,8'	1918-2011	Mensuales
Pluviómetro testigo	EEC	0	-35° 02,8'	-57° 59,2'	2008-2011	Semanales
Pluviómetro campo	EEC	0	-35° 03,1'	-57° 58,8'	2008-2011	Diarios
Aeródromo Dolores (SMN)	PFD	65km	-36° 19,0'	-57° 43,0'	1959-2012	Diarios
Estación testigo (Agromet)	PFD	0	-36° 28,2'	-58° 12,9'	2009-2012	½ Hora
Pluviómetro campo	PFD	0	-36° 28,4'	-58° 13,1'	2009-2012	Diarios

# 2. Intercepción de las precipitaciones



## 2. Intercepción de las precipitaciones

		EEC					PFD				
		P	N	P <sub>mes</sub> (mm)			P	N	P <sub>mes</sub> (mm)		
		mm	semana	Med.	Máx.	Mín.	mm	semana	Med.	Máx.	Mín.
Dic.	Predic. Serie histórica	215,2	10	71,7	105,6	51,0	179,6	19	59,9	84,0	31,3
Ene.	Media	253,0	Media	84,3	136,4	18,4	259,9	Media	86,6	115,3	55,4
Feb.	EEC	380,5	1008,7	126,8	293,0	55,7,0	320,8	1922,5	106,9	209,6	16,0
Verano	PFD	748,7	941,7	1426,5		563,3	760,3	976,6			
Mar.		239,8	14	79,9	117,2	35,2	316,9	10	105,6	138,7	43,2
Abr.		147,0	11	49,0	71,8	23,8	200,2	10	66,7	102,3	40,9
May.		169,2	11	56,4	87,2	40,4	149,3	9	49,8	69,9	10,8
Otoño		556,0					666,3				
Jun.		207,4	12	69,1	129,8	23,0	242,8	11	80,9	107,3	31,0
Jul.		310,5	10	103,5	106,2	98,7	219,0	8	73,0	114,7	33,3
Ago.		121,8	11	40,6	56,0	26,8	262,1	8	87,4	224,6	14,2
Invierno		639,7					723,8				
Sep.		229,8	9	76,6	111,0	21,4	178,5	10	59,5	98,2	20,0
Oct.		222,6	9	74,2	121,8	40,4	199,9	11	66,6	90,7	40,0
Nov.		270,8	13	90,3	161,0	28,0	400,8	13	133,6	166,2	111,7
Primavera		723,2					779,2				
Total		2767,6	132				2929,6	126			



# 2. Intercepción de las precipitaciones

$$I = P - (T_r + E_f)$$

(Pritchett, 1991)

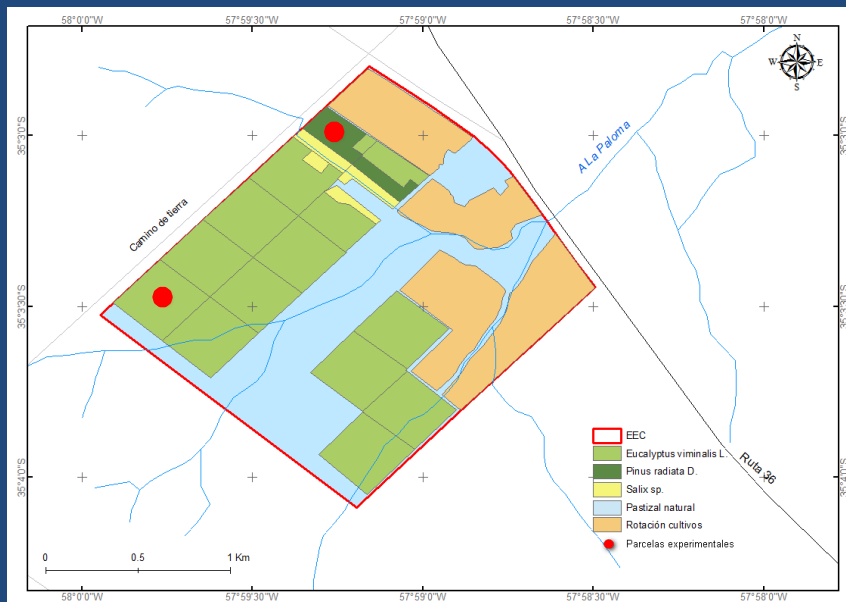
I = Intercepción

P = Precipitación

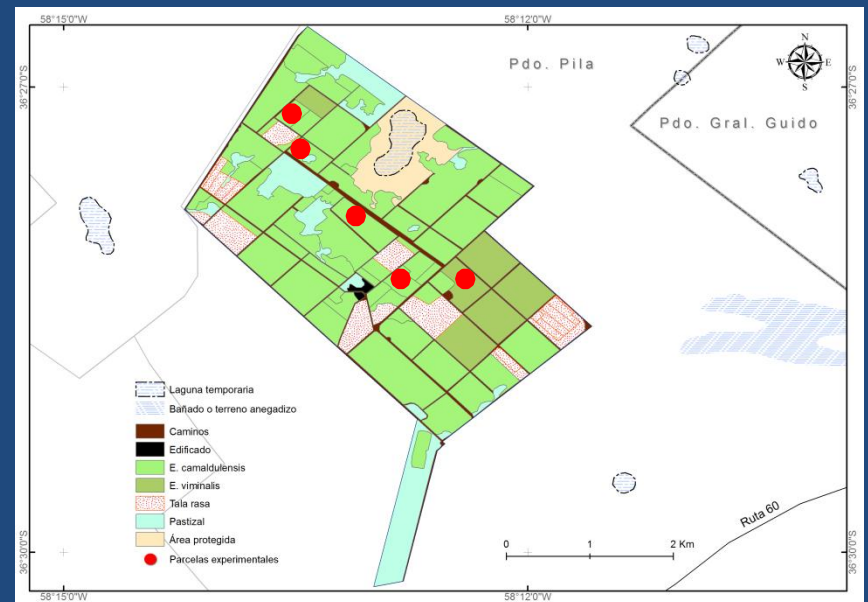
$T_r$  = Traslación

$E_f$  = Esguerrimiento fustal

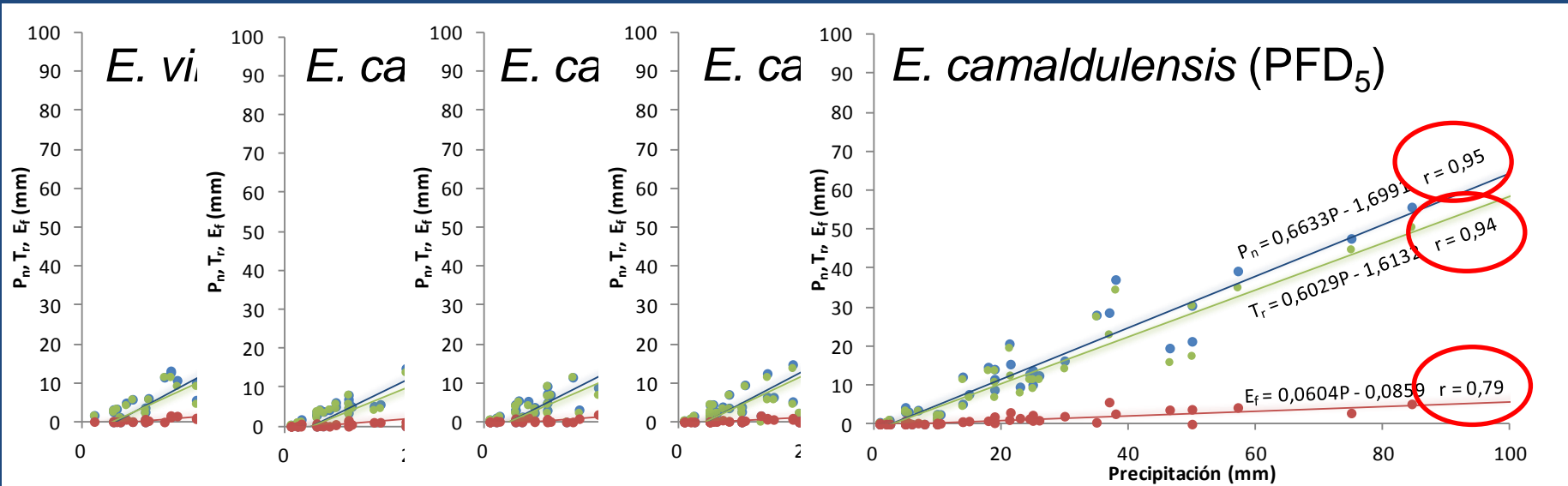
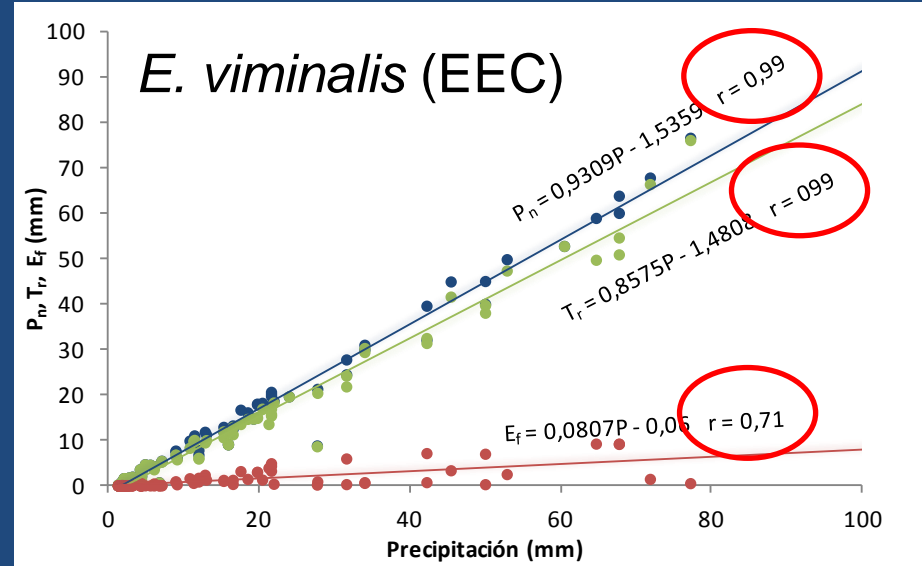
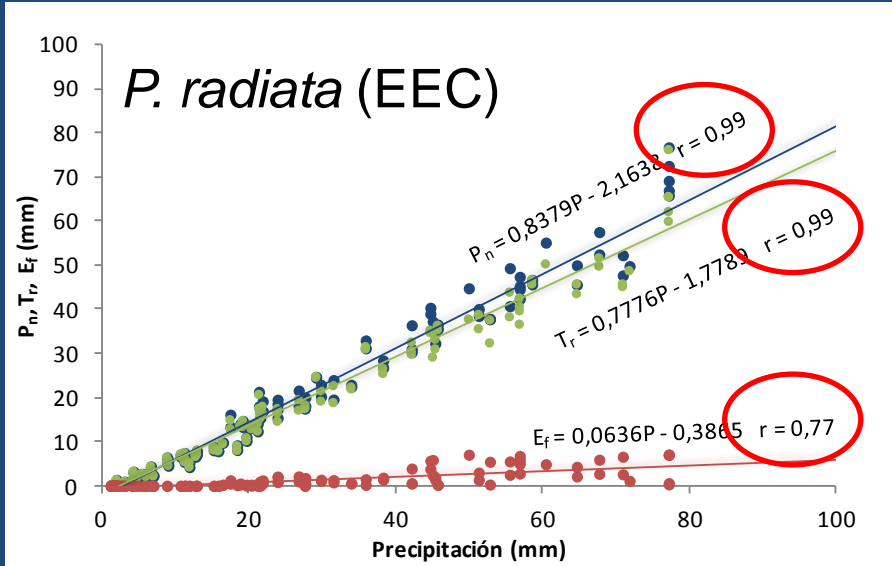
## Estación El Centauro (EEC)



## Predio Forestal Dolores (PFD)



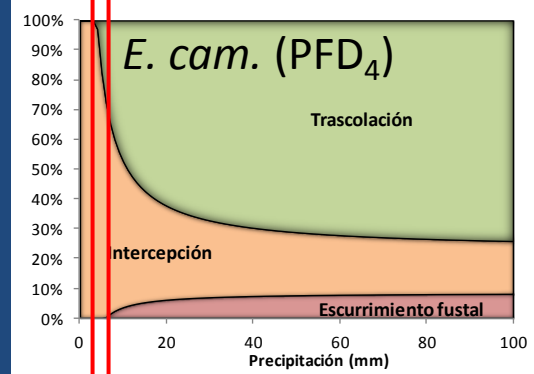
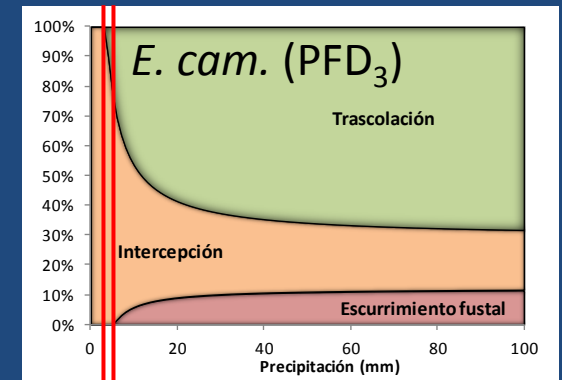
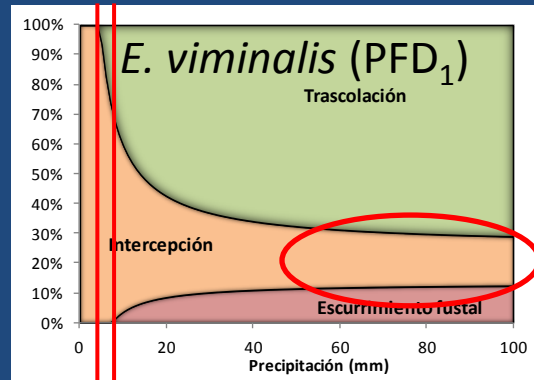
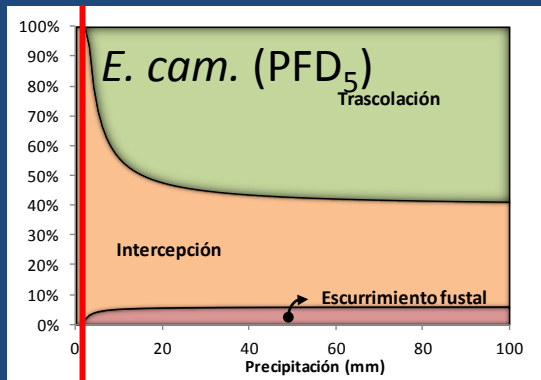
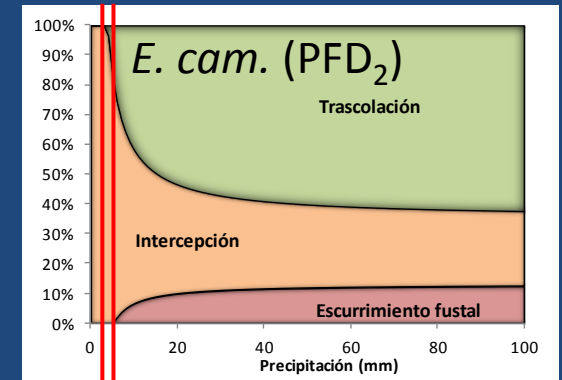
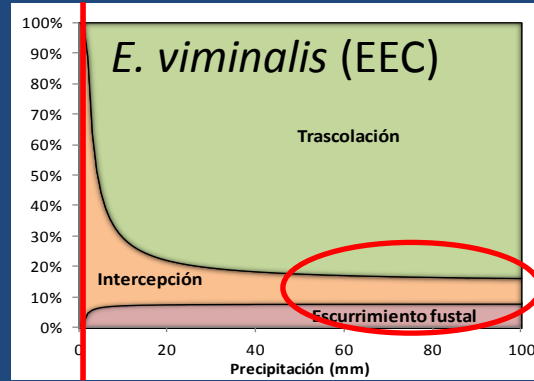
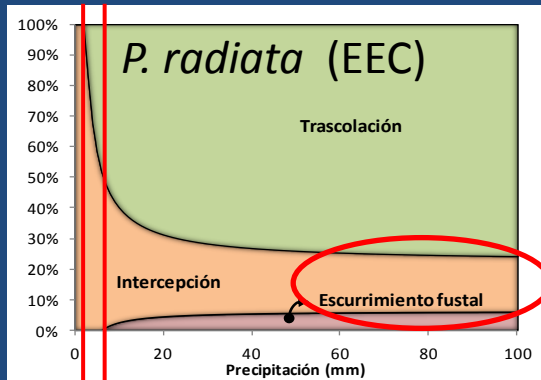
# 2. Intercepción de las precipitaciones



# 2. Intercepción de las precipitaciones

E. cam. (PFD <sub>5</sub> )	P mm	T <sub>r</sub>		E <sub>f</sub>		I		E <sub>f</sub> %	I		E <sub>f</sub> %	I		%	I			
		mm	%	mm	%	mm	%		mm	%		mm	%		mm	%		
Dic.	179,6	103,4	57,6	6,0	3,3	70,2	39,1	5,3	40,4	22,5	7,7	7,1	47,3	26,3	7,20	55,2	30,8	5
Ene.	259,9	151,8	58,4	8,9	3,4	99,1	38,1	5,7	53,4	20,6	6,6	7,5	64,0	24,6	7,74	75,2	28,9	0
Feb.	320,8	188,6	58,8	11,1	3,5	121,1	37,7	5,9	63,3	19,7	8,8	7,7	76,6	23,9	7,97	90,3	28,1	0
<b>Verano</b>	<b>760,3</b>	<b>443,8</b>	<b>58,4</b>	<b>26,0</b>	<b>3,4</b>	<b>290,4</b>	<b>38,2</b>	<b>5,7</b>	<b>157,1</b>	<b>20,7</b>	<b>11,1</b>	<b>7,5</b>	<b>187,9</b>	<b>24,7</b>	<b>7,71</b>	<b>220,7</b>	<b>29,0</b>	<b>2</b>
Mar.	316,9	186,2	58,8	11,0	3,5	119,7	37,8	5,9	62,7	19,8	6,5	7,7	75,8	23,9	7,96	89,3	28,2	0
Abr.	200,2	115,9	57,9	6,7	3,4	77,6	38,8	5,5	43,7	21,8	6,4	7,2	51,6	25,8	7,38	60,4	30,2	7
May.	149,3	85,1	57,0	4,9	3,3	59,2	39,7	5,1	35,4	23,7	6,1	6,7	41,0	27,5	6,85	47,7	32,0	1
<b>Otoño</b>	<b>666,3</b>	<b>387,2</b>	<b>58,1</b>	<b>22,6</b>	<b>3,4</b>	<b>256,5</b>	<b>38,5</b>	<b>5,6</b>	<b>141,9</b>	<b>21,3</b>	<b>10,0</b>	<b>7,4</b>	<b>168,4</b>	<b>25,3</b>	<b>7,54</b>	<b>197,4</b>	<b>29,6</b>	<b>0</b>
Jun.	242,8	141,5	58,3	8,3	3,4	93,0	38,3	5,7	50,7	20,9	6,1	7,5	60,4	24,9	7,66	70,9	29,2	4
Jul.	219,0	127,2	58,1	7,4	3,4	84,4	38,5	5,6	46,8	21,4	6,1	7,3	55,5	25,3	7,52	65,0	29,7	1
Ago.	262,1	153,2	58,4	9,0	3,4	99,9	38,1	5,7	53,8	20,5	8,8	7,5	64,4	24,6	7,75	75,7	28,9	0
<b>Invierno</b>	<b>723,8</b>	<b>421,9</b>	<b>58,3</b>	<b>24,7</b>	<b>3,4</b>	<b>277,2</b>	<b>38,3</b>	<b>5,7</b>	<b>151,2</b>	<b>20,9</b>	<b>9,9</b>	<b>7,5</b>	<b>180,3</b>	<b>24,9</b>	<b>7,65</b>	<b>211,7</b>	<b>29,2</b>	<b>4</b>
Sep.	178,5	102,8	57,6	5,9	3,3	69,8	39,1	5,3	40,2	22,5	6,6	7,0	47,1	26,4	7,19	55,0	30,8	6
Oct.	199,9	115,7	57,9	6,7	3,4	77,5	38,8	5,5	43,7	21,8	6,4	7,2	51,5	25,8	7,38	60,3	30,2	7
Nov.	400,8	236,8	59,1	14,0	3,5	150,0	37,4	6,0	76,4	19,0	7,7	7,9	93,3	23,3	8,17	110,1	27,5	1
<b>Primavera</b>	<b>779,2</b>	<b>455,3</b>	<b>58,4</b>	<b>26,7</b>	<b>3,4</b>	<b>297,2</b>	<b>38,1</b>	<b>5,7</b>	<b>160,2</b>	<b>20,6</b>	<b>11,7</b>	<b>7,5</b>	<b>191,8</b>	<b>24,6</b>	<b>7,74</b>	<b>225,4</b>	<b>28,9</b>	<b>0</b>
<b>Total</b>	<b>2929,6</b>	<b>1708,2</b>	<b>58,3</b>	<b>100,1</b>	<b>3,4</b>	<b>1120,3</b>	<b>38,3</b>	<b>5,7</b>	<b>610,4</b>	<b>20,8</b>	<b>13,7</b>	<b>7,5</b>	<b>728,4</b>	<b>24,9</b>	<b>7,7</b>	<b>855,2</b>	<b>29,2</b>	<b>4</b>

# 2. Intercepción de las precipitaciones



## 2. Intercepción de las precipitaciones

Sitio	Sp	D <sub>dt</sub> (árb/ha)	Edad (años)	h (m)	DAP (cm)	AB (m <sup>2</sup> /ha)	f <sub>c</sub> (%)	T <sub>r</sub> (%)	E <sub>f</sub> (%)	I (%)	E <sub>f0</sub> (mm)	I <sub>0</sub> (mm)
EEC	P. rad.	1120	33	22,0	28,9	73,47	53,5	75,4	4,3	20,3	6,1	2,6
	E. vim.	1440	33 (13)*	20,0	8,85	8,86	36,7	83,8	6,7	9,5	0,7	1,6
	E. vim <sub>1</sub>	822	17	22,0	12,2	9,61	60,0	70,4	8,2	21,4	7,3	5,0
	E. cam <sub>2</sub>	1200	24	22,2	24,0	54,29	31,0	63,1	7,7	29,2	5,2	3,6
PFD	E. cam <sub>3</sub>	1200	17	22,5	14,1	18,74	42,2	67,7	7,5	24,9	5,2	3,7
	E. cam <sub>4</sub>	650	15	21,5	14,5	10,73	26,2	73,5	5,7	20,8	5,8	4,0
	E. cam <sub>5</sub>	666	34	23,9	23,3	28,40	47,1	58,3	3,4	38,3	1,4	2,6

## 2. Intercepción de las precipitaciones

Analizar la redistribución de las precipitaciones bajo plantaciones forestales adultas de *Pinus radiata* Don, *Eucalyptus viminalis* Labill y *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh en los dos predios de la llanura pampeana.

### Datos pluviográficos

- Buena correlación entre los valores anuales y mensuales (EEJH y EMAD).
- P anual similares a bibliografía (Hurtado *et al.*, 2006 y Batista *et al.*, 2005).
- Gran correlación para los pares: EEJH-Testigo EEC y EMAD-Testigo PFD.

# 2. Intercepción de las precipitaciones

## Redistribución de las lluvias

- Buen ajuste lineal ( $r > 0,7$ ) entre componentes ( $T_r$ ,  $E_f$ ,  $P_n$ ) coincidente bibliografía.
- Importancia parcial de los componentes  $T_r$  y  $E_f$  frente a la  $P_n$ .
- Análisis temporal: • **Variación intraespecífica:** similares a bibliografía.  
(EEC)
  - **Variación interespecífica:** l en pino duplican a eucaliptos.
- Análisis temporal: • **Variación intraespecífica:** dentro de valores normales.  
(PFD)
  - Valores elevados de Intercepción respecto a bibliografía.
  - Relación directa entre l y edad de rodales (*E. cam.*).

## 2. Intercepción de las precipitaciones

La elevada capacidad de intercepción que caracteriza a las forestaciones, se manifiesta con mayor intensidad en los rodales de pino frente a los de eucalipto y, a su vez, aumenta en relación directa con la densidad de los rodales de este último género.

- ✓ Se acepta parcialmente la hipótesis de que la capacidad de intercepción de los pinos estudiados supera a la de los eucaliptos.
- ✓ Se rechazar la hipótesis de que la capacidad de intercepción de los rodales de *E. camaldulensis* aumente con la densidad de los mismos.



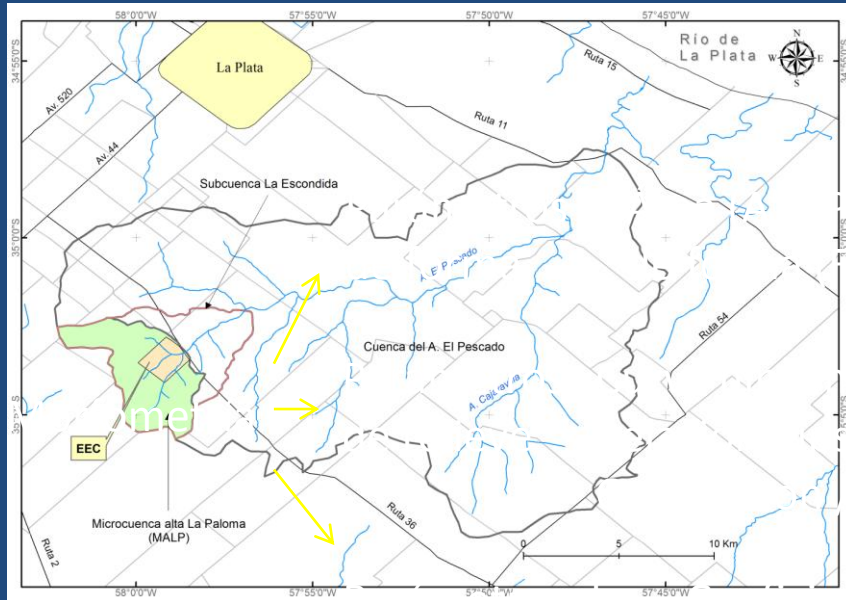
### 3. Escurrimiento superficial

Modelizar el componente de escurrimiento superficial bajo las condiciones de uso actual de los predios analizados y simular posibles escenarios de cambio de uso en la conversión pastizal-forestación.

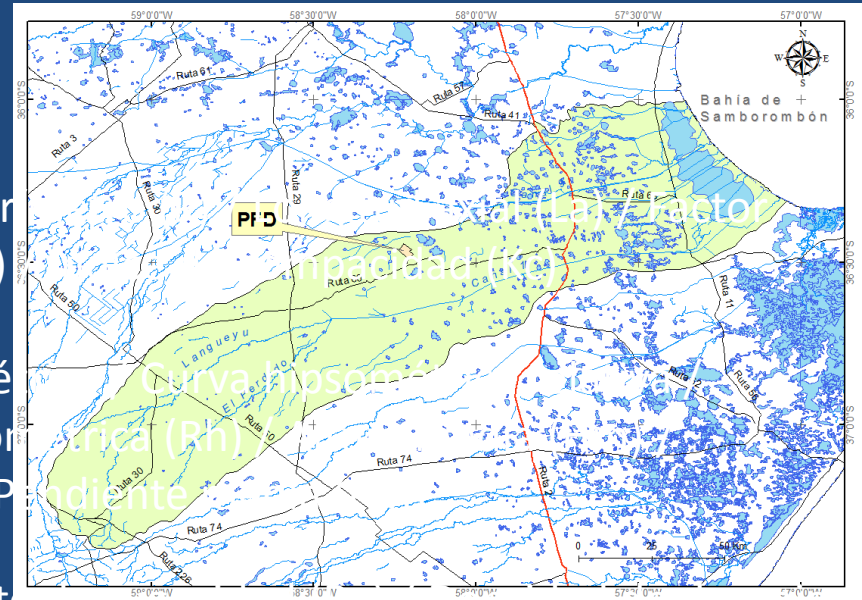
La conversión de pastizales por forestaciones genera una reducción sustancial del flujo de escurrimiento superficial al punto de llegar a anularlo.

# 3. Escurrimiento superficial

## Estación El Centauro (EEC)



## Predio Forestal Dolores (PFD)



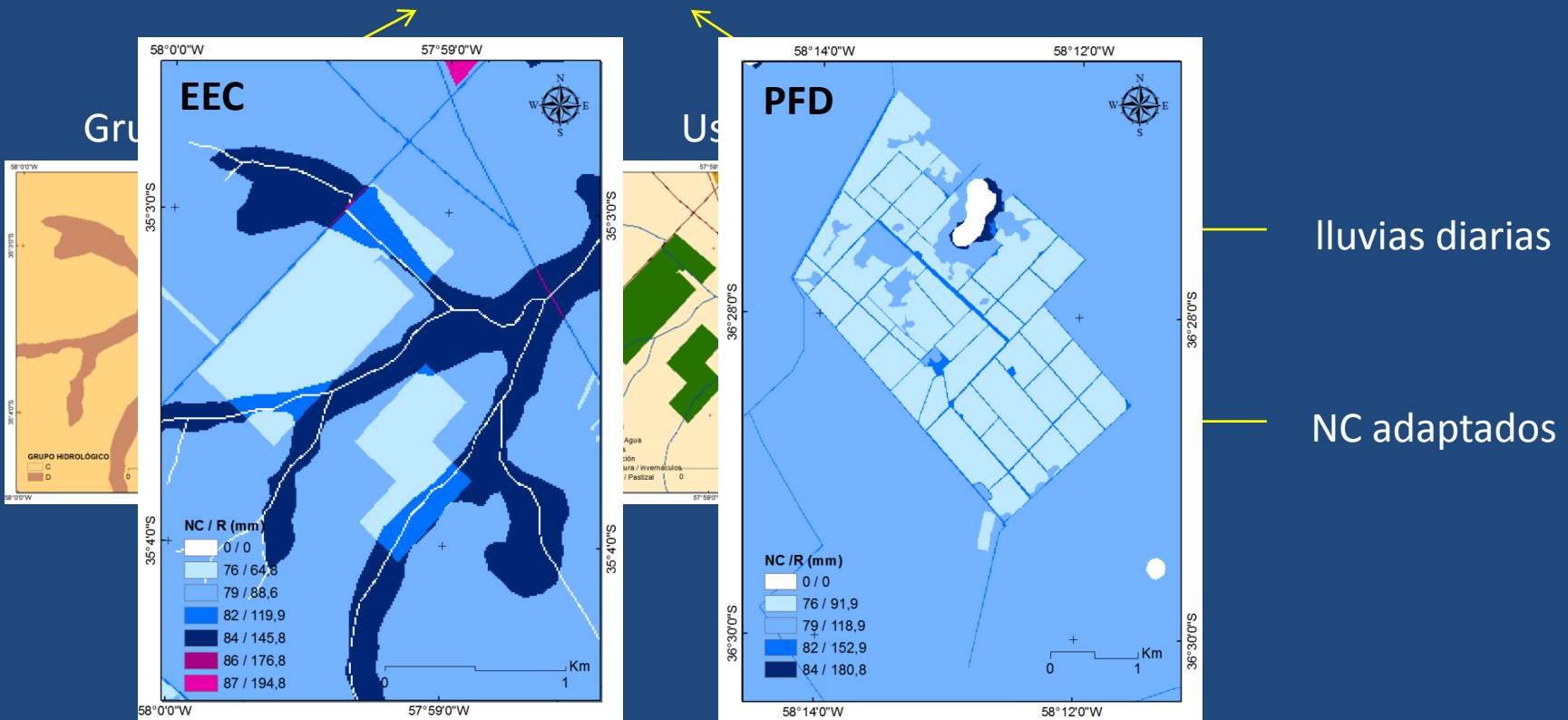
Parámetros de red hidrográfica: Coeficiente de rugosidad ( $Ka$ ) / Densidad de drenaje ( $Dd$ ) / Pendiente media del cauce ( $J$ ) / Tiempo de concentración ( $Tc$ ) / Orden de los cursos de agua

# 3. Escurrimiento superficial

Escurrimiento superficial → Modelo hidrológico L-THIA NPS (Engel *et al.*, 2003)

← Metodología (NC)

← Entorno SIG



# 3. Escurrimiento superficial

Predio	NC	Ocupación (%)	R (mm)	P (mm)	R <sub>a</sub> (mm)
EEC	0	1,8	0	922,5	94,2
	76	34,7	64,8		
	79	32,3	88,6		
	82	9,1	119,9		
	84	22,1	145,8		

Predio	NC	Ocupación (%)	R (mm)	P (mm)	R <sub>a1</sub> (mm)
EPCD	0	2,1	0	976,6	90,98
	76	67,4	91,9		
	79	67,0	88,6		
	82	31,7	145,8		
	84	2,9	180,8		
PFD	79	90,3	118,9	976,6	119,2
	82	6,7	152,9		
	84	0,9	180,8		

Predio	NC	Ocupación (%)	R (mm)	P (mm)	R <sub>a2</sub> (mm)
EEC	0	1,8	0	922,5	80,8
	76	67,0	64,8		
	82	31,2	119,9		
PFD	0	2,1	0	976,6	94,9
	76	90,3	91,9		
	82	6,7	152,9		
	84	0,9	180,8		

# 3. Escurrimiento superficial

Modelizar el componente de escurrimiento superficial bajo las condiciones de uso actual de los predios analizados y simular posibles escenarios de cambio de uso en la conversión pastizal-forestación.

- Obtención de R superiores a bibliografía, especialmente en PFD.
- No es posible discriminar R para cada cobertura (ausencia de valores de NC ajustados).
- Importante reducción de R anual en la conversión Past-Forest., cercanas a bibliografía.
- Reducciones de R (conversión Past-Forest) insuficientes para anular este componente.

# 3. Escurrimiento superficial

La conversión de pastizales por forestaciones genera una reducción sustancial del flujo de escurrimiento superficial al punto de llegar a anularlo.

✓ Los productos obtenidos de esta metodología impiden aceptar la hipótesis de que las forestaciones anulan el componente de escurrimiento superficial, pero permiten identificar una clara reducción del mismo.

## 4. Infiltración y aguas subterráneas

Evaluar las fluctuaciones del nivel de capa freática a nivel predial, como base para determinar las relaciones de recarga/descarga bajo los usos/coberturas considerados en cada sitio de estudio.

Ante la existencia de períodos con excesos hídricos, las forestaciones estudiadas favorecen la infiltración y recarga freática bajo estas coberturas. Por el contrario, en esta conversión se acentuarán los procesos de descarga freática ante períodos con baja pluviometría.

# 4. Infiltración y aguas subterráneas

$$I = P - ETP$$

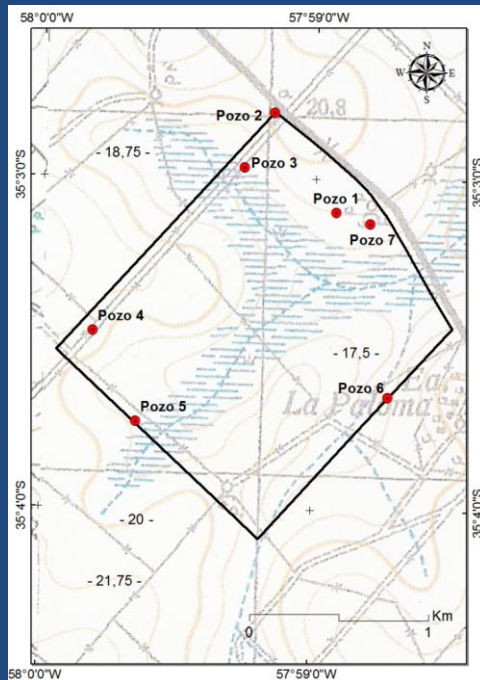
Risiga (Nuñez *et al.*, 2007)

I = infiltración

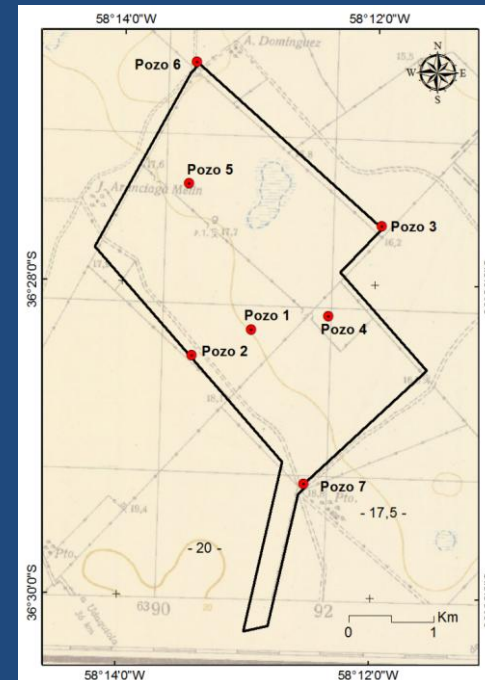
P = precipitación

ETP = evapotranspiración potencial

## EEC

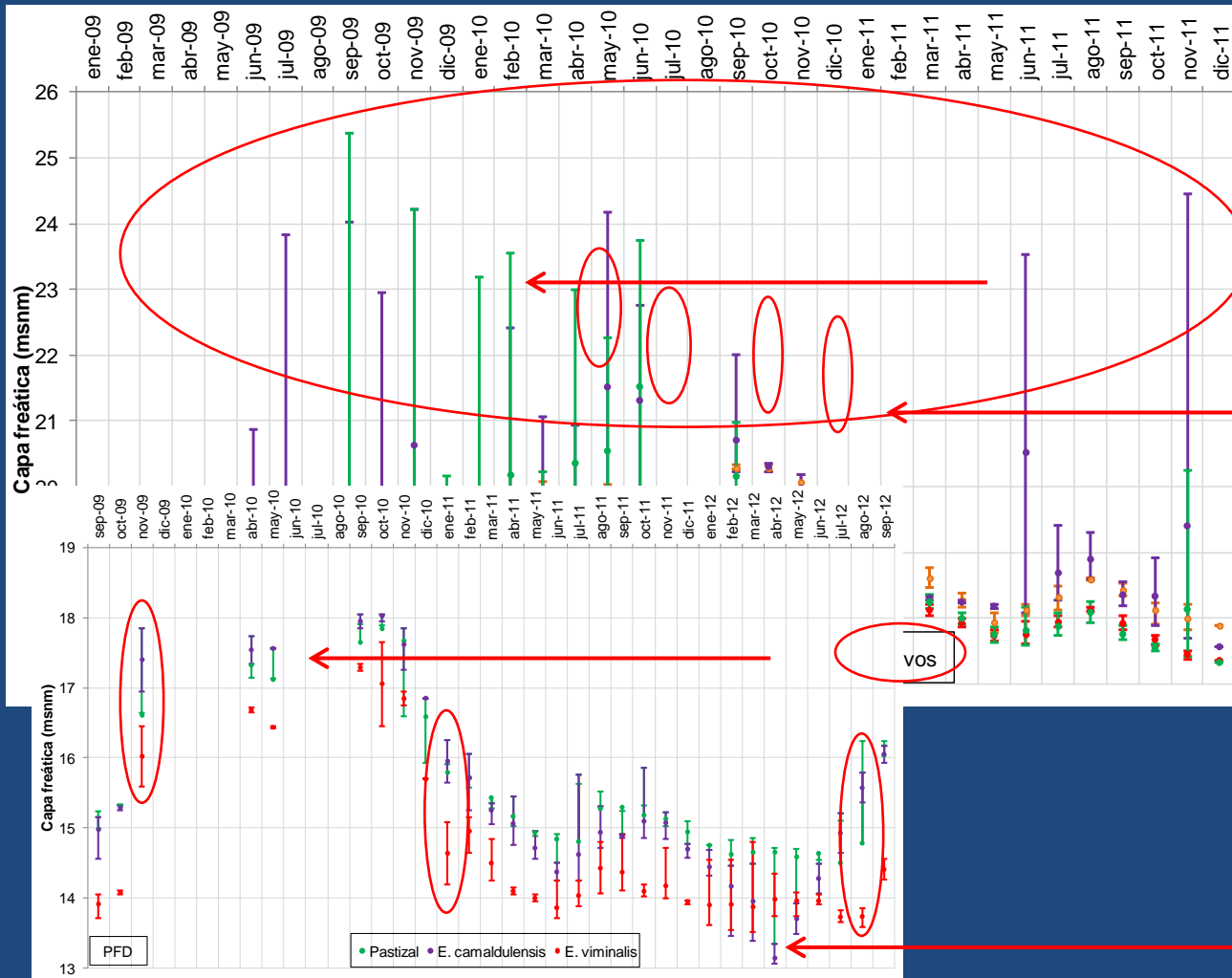


## PFD





# 4. Infiltración y aguas subterráneas



# 4. Infiltración y aguas subterráneas

EEC	Past.-Cult.	Past.-Euca.	Past.-Pino	Cult.-Euca.	Cult.-Pino	Euca.-Pino
$\Delta(+)$ [m]	0,80	0,97	1,09	0,81	0,38	0,90
$\Delta(-)$ [m]	0,00	-0,44	0,00	-0,32	-0,17	0,00
$\Delta$ prom. [m]	0,39	0,12	0,46	0,27	0,05	0,33

$\Delta(+)$ : variación positiva máxima entre el nivel de capa freática del par de usos considerados. Representa una pendiente o gradiente negativo y por tanto un sentido de flujo de izquierda a derecha (eje: de Past. a Cult.).

$\Delta(-)$ : variaciones en sentido opuesto (de derecha a izquierda).

$\Delta$ prom.: desnivel promedio.

Past.: pastizal; Cult.: rotación de cultivos; Euca.: *E. viminalis*; Pino: *P. radiata*.

PFD	Pastizal-E. cam.	Pastizal-E. vim.	E. cam.-E. vim.
$\Delta(+)$ [m]	1,58	1,74	2,26
$\Delta(-)$ [m]	-1,21	0,00	-1,11
$\Delta$ prom. [m]	0,17	0,87	0,70

$\Delta(+)$ : variación positiva máxima entre el nivel de capa freática del par de usos considerados. Representa una pendiente o gradiente negativo y por tanto un sentido de flujo de izquierda a derecha (eje: de Past. a Cult.).

$\Delta(-)$ : variaciones en sentido opuesto (de derecha a izquierda).

$\Delta$ prom.: desnivel promedio.

E. vim.: *E. viminalis*; E. cam.: *E. camaldulensis*.

# 4. Infiltración y aguas subterráneas

## Aporte o remoción de agua subterránea

EEC	PFD	Pastizal		Cultivos		E. camaldulensis		E. viminalis		Pastizata	
		$\Delta S_v$ (mm)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta S_v$ (mm)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta S_v$ (mm)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta S_v$ (mm)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta S_v$ (mm)	$\Delta H$ (mm)
ene-09	sep-09	0,168	-19,27	-0,46	46,10	0,162	0,09	19	-19,04	-0,09	0,20
feb-09	oct-09	0,136	-11,07	-0,43	38,10	2,592	0,07	23	22,855	-0,08	0,10
mar-09	nov-09	0,101	-0,87	-0,09	29,10	8,8	0,07	36	-36,4	-0,05	0,10
abr-09	abr-10	0,101	-16,1	-0,10	10,10	-9,8	0,07	19	-18,5	-0,12	0,10
may-09	may-10	0,101	-7,9	-0,11	6,7	0,23	0,07	15	15,82	-0,07	0,10
jun-09	may-07	0,101	-6,5	-0,20	17,10	0,163	0,07	0,2	1,6	-0,08	0,10
jul-09	sep-09	0,101	2,4	0,66	96,10	0,60	0,07	3,85	603,3	-0,07	0,10
ago-09	oct-09	0,105	-10,07	-0,33	370,10	0,901	0,07	11	588,41	-0,07	0,20
sep-09	nov-09	0,130	53,27	0,97	1,00,10	-469	0,07	69	1110,90	-0,09	0,63
oct-09	dic-10	0,094	18,87	0,65	66,10	-0,46	0,07	78	-681,805	0,47	0,70
nov-09	ene-10	0,126	43,37	0,38	34,10	-0,89	0,07	59	770,62	0,18	0,40
dic-09	feb-10	0,133	-24,07	4,23	38,10	486,2	0,07	87	-50,30	0,18	0,10
ene-10	mar-10	0,132	-12,67	-4,25	40,10	-495,0	0,07	17	860,23	-0,33	0,49
feb-10	abr-10	0,101	87,4	1,13	80,10	112,6	0,07	77	-116,70	0,79	0,10
mar-10	may-10	0,101	-22,6	-0,36	30,10	-36,4	0,07	0,3	77,315	-0,16	0,10
abr-10	jun-10	0,101	-8,8	-0,10	10,10	-9,9	0,07	0,8	3,1	-0,07	0,10
may-10	jun-11	0,104	44,8	0,39	90,10	39,3	0,07	71	8,0	-0,02	0,10
jun-10	jul-11	0,124	38,6	1,67	52,10	166,5	0,07	14	70,6	0,27	0,10
sep-10	ago-10	0,102	6,07	-1,83	40,10	-169,0	0,07	66	214,019	0,67	0,10
oct-10	sep-11	0,092	-19,97	-0,16	54,10	0,41	0,07	16	-168,21	-0,07	0,10
nov-10	oct-10	0,092	-39,97	-0,37	54,10	0,270	0,07	76	-160,22	-0,08	0,10
dic-10	nov-10	0,095	-70,07	-0,37	64,10	-0,47	0,07	81	-750,806	-0,08	0,40
feb-11	dic-10	0,130	-29,47	-0,26	72,10	-0,34	0,07	28	-840,202	-0,24	0,10
mar-11	ene-11	0,120	-37,97	-0,28	72,10	-0,7	0,07	0,7	-270,822	-0,22	0,10
abr-11	feb-11	0,104	-29,97	-0,23	80,10	-2,34	0,07	0,6	-70,18	-0,09	0,10
may-11	mar-11	0,101	-2,2	-0,25	80,10	-24,9	0,07	12	-57,05	-0,19	0,10
jun-11	abr-11	0,101	27,5	0,21	0,10	6,33	0,07	29	-11,8	-0,19	0,10
jul-11	may-11	0,101	27,4	0,43	0,10	42,7	0,07	68	28,7	0,28	0,10
ago-11	jun-11	0,120	-9,07	-0,37	14,10	-36,8	0,07	50	-0,01	0,07	0,10
sep-11	jul-11	0,101	-38,8	-0,27	22,10	-26,7	0,07	50	67,7	-0,11	0,10
oct-11	ago-11	0,091	-14,97	-0,77	56,10	0,72	0,07	32	-49,7	-0,31	0,10
nov-11	ago-11	0,109	-10,97	-0,97	44,10	0,58	0,07	18	0,31	-0,23	0,10
dic-11	sep-11	0,101	0,07	0,28	42,10	0,24	0,07	0,0	-32,023	-0,23	0,10
									-17,67	-0,04	0,40
									16,80	0,07	0,20
									0,30	0,07	0,20
<b>Total</b>	<b>Total</b>		<b>-43,7</b>	<b>114,10</b>		<b>-84,1</b>		<b>113,40</b>	<b>-72,1</b>		<b>59,5-68,5</b>

# 4. Infiltración y aguas subterráneas

## Aporte o remoción de agua subterránea

Período	EEC - $\Delta h$ (mm)				PFD - $\Delta h$ (mm)		
	Pastizal	Cultivos	E. vim.	P. rad.	Pastizal	E. cam.	E. vim.
ver-08	-18,7	-30,8	-19,7	-22,4			
oto-09	-39,7	-33,2	-34,0	-34,4			
inv-09	41,9	29,2	233,4	49,3	43,7	42,0	23,8
pri-09	80,6	45,6	-173,2	23,0	144,1	153,6	182,0
2009	64,7	199,3	116,2	50,5	187,8	195,6	205,8
ver-09	73,2	94,2	271,5	78,8			
oto-10	27,3	452,5	94,6	73,0	16,5	34,7	41,3
inv-10	35,6	-383,3	-172,8	4,8	15,4	0,0	7,7
pri-10	-60,4	-60,0	-136,0	-92,1	-81,1	-69,3	-115,5
2010	92,1	-106,3	-83,1	-9,4	-114,8	-76,6	-109,9
ver-10	-111,2	-106,2	-62,8	-76,0	-83,3	-126,0	-91,0
oto-11	-56,4	-65,9	523,8	-28,2	-39,2	-56,0	-10,5
inv-11	37,2	14,2	-533,9	1,7	29,3	45,5	-9,8
pri-11	-53,2	-40,4	-63,0	-46,0	-30,5	-23,1	-14,0
2011	-200,4	-177,1	-105,2	-109,6	-64,3	-127,4	-93,1
ver-11					0,1	-5,6	62,3
oto-12					-14,1	0,0	-60,9
inv-12					113,3	117,6	44,1
2012					105,1	121,8	56,7
Total	-43,7	-84,1	-72,1	-68,5	114,1	113,4	59,5

# 4. Infiltración y aguas subterráneas

Evaluar las fluctuaciones del nivel de capa freática a nivel predial, como base para determinar las relaciones de recarga/descarga bajo los usos/coberturas considerados en cada sitio de estudio.

- Evolución de nivel freático bajo usos/coberturas estrechamente vinculadas a lluvias.
- Diferencia entre niveles causados por consumo diferencial de las coberturas y/o variaciones en estructura y conformación de suelos bajo ellas.
- Aporte o remoción de agua freática bajo forestaciones causado por efecto directo de las coberturas y de aportes puntuales de las lluvias.
- Mayor consumo de agua freática de *P. radiata* y rotación de cultivos frente a *E. viminialis* y pastizal (EEC).
- Mayor consumo de *E. vim.* frente a *E. cam.* y el de este último frente al pastizal (PFD).
- Pastizales vs. Forestaciones con variaciones  $> 2$  m de nivel freático evidencian mayor consumo de agua por parte de las forestaciones y la capacidad de aprovechar el agua freática.

# 4. Infiltración y aguas subterráneas

Ante la existencia de períodos con excesos hídricos, las forestaciones estudiadas favorecen la infiltración y recarga freática bajo estas coberturas. Por el contrario, en esta conversión se acentuarán los procesos de descarga freática ante períodos con baja pluviometría.

- ✓ Se verifica la hipótesis de que las forestaciones de PFD favorecen los procesos de infiltración ante períodos de excesos hídricos, mientras que acentúan los períodos de déficits al incrementar la descarga del acuífero freático en períodos con baja pluviometría.
- ✓ En EEC, este supuesto se comprueba parcialmente al observar que las forestaciones atenúan o disminuyen los procesos de descarga en épocas secas o de baja pluviometría.

## 5. Evapotranspiración

Establecer una metodología sencilla para la estimación de los coeficientes de cultivo de las especies forestales a fin de cuantificar la evapotranspiración de los distintos cultivos evaluados.

Si se acepta que los sitios de estudio poseen características climáticas comparables, el rodal de pino presenta un menor rendimiento hídrico (descarga freática) frente a los de eucalipto y, dentro de estos, que el rendimiento hídrico de los rodales de *E. viminalis* superará a los de *E. camaldulensis*.

# 5. Evapotranspiración

Evapotranspiración del cultivo  
( $ET_C$ )

Método FAO56  
(Allen *et al.*, 1998).

Evapotranspiración de  
referencia ( $ET_0$ )

Coefficiente único del  
cultivo ( $k_C$ )

**AGROCLIMA**  
(Abbate, 2004)

Coef. de transpiración  
del cultivo ( $k_{cb}$ )

Coef. de evaporación  
del suelo ( $k_e$ )

$$ET_C = (K_{cb} + K_e) \times ET_0$$



# 5. Evapotranspiración

$$ET_{C aj} = (K_{cb aj} + K_{e aj}) \times ET_0$$

$$K_{cb aj} \approx K_{cb med aj} = K_{c min} + (K_{cb full} - K_{c min}) \{ \min[1, 2f_c] (f_{c eff})^{(1/1+h)} \}$$

$$f_{c eff} = \min(1, f_c / \text{sen}(n))$$

$$\text{sen}(n) = \text{sen}(\varphi) \times \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \times \cos(\delta)$$

$$\delta = 0,409 \times \text{sen}(2\pi/365 \times J) - 1,32 = \text{“radianes”}$$

$$K_{cb full} = K_{cb,h} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004 \times (HR_{min} - 45)] (h/3)^{0,3}$$

$$HR_{min} = [e^0(T_{min}) / e^0(T_{max})] 100$$

$$e^0(T) = 0,6108 \exp [ 17,2(T) / (T+237,3) ]$$

$$K_{e aj} = K_e \times (\% \text{ cubierto por mantillo} \times 0,5 / 100)$$

$$K_e = \min [K_r (K_{r max} - K_{cb aj}), f_{ew} \times K_{r max}]$$

$$K_{c max} = \max [ \{ 1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{min} - 45)] (h/3)^{0,3} \}, \{ K_{cb aj} + 0,05 \} ]$$

$$K_r = AET - D_{e,i-1} / (AET - AFE) \quad [ \text{para } D_{e,i-1} > AFE ]$$

$$F_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$$

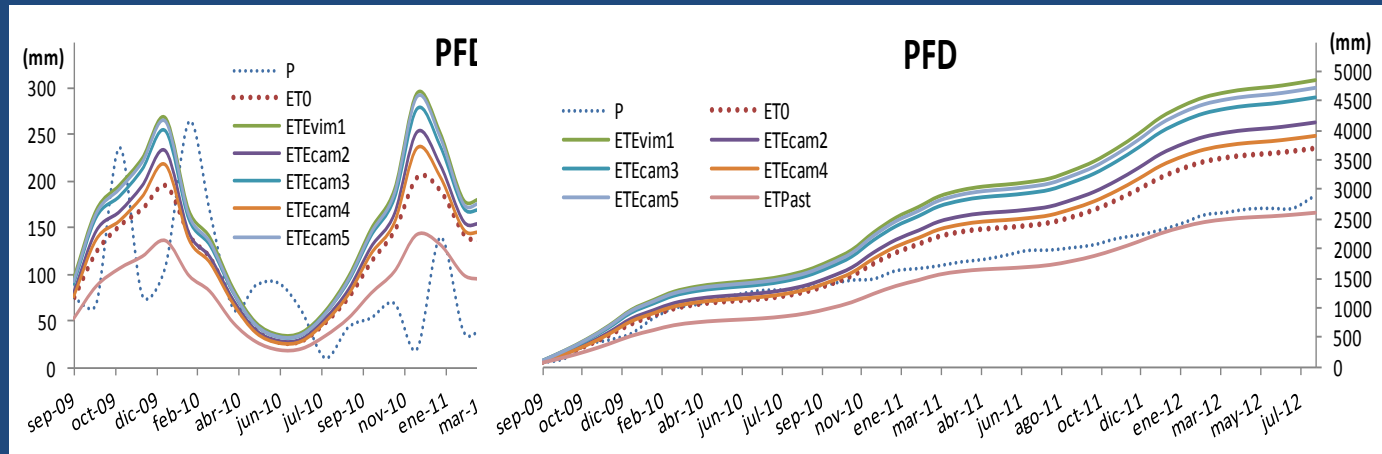
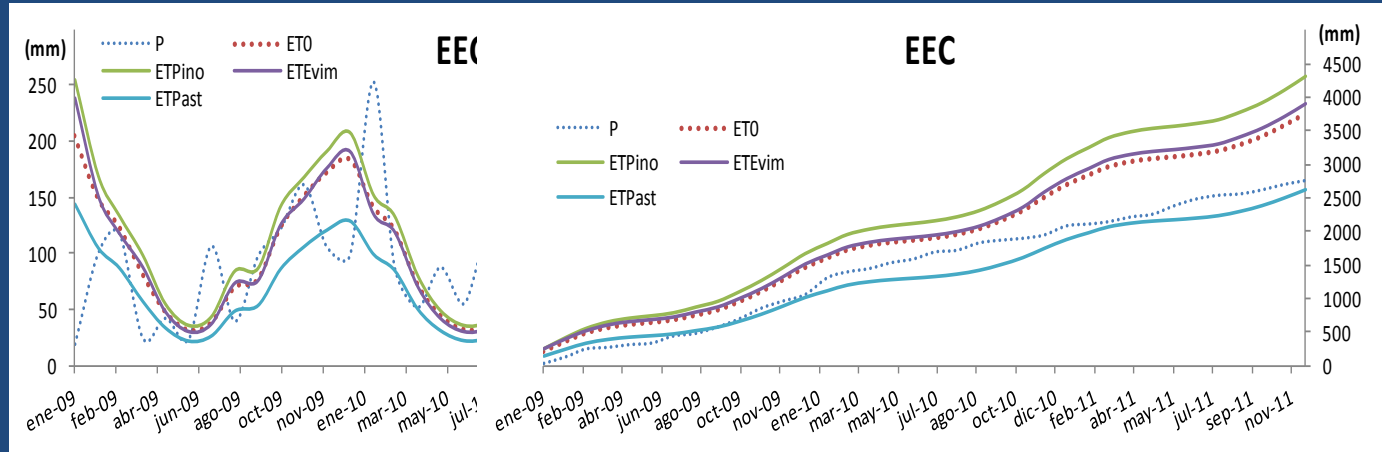
# 5. Evapotranspiración

		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
EEC	P	84,3	126,8	79,9	49,0	56,4	69,1	103,5	40,6	76,6	74,2	90,3	71,7	<b>922,5</b>
	ET <sub>0</sub>	192,8	145,4	123,8	76,7	45,2	30,7	35,8	57,2	83,8	120,8	155,1	182,2	<b>1249,3</b>
PFD	P	86,6	106,9	105,6	66,7	49,8	80,9	73,0	87,4	59,5	66,6	133,6	59,9	<b>976,6</b>
	ET <sub>0</sub>	195,4	147,5	121,4	73,3	43,2	27,1	33,2	49,2	83,1	120,4	155,5	186,1	<b>1235,3</b>

		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total
EEC	ET <sub>Pino</sub>	226,5	162,2	137,6	88,5	51,1	34,6	40,7	66,1	98,0	137,9	176,3	213,2	<b>1432,9</b>
	ET <sub>Evim</sub>	209,1	146,8	124,2	78,6	44,9	30,1	35,5	58,3	88,9	125,5	160,7	199,5	<b>1302,0</b>
	ET <sub>Past</sub>	134,9	101,8	86,6	53,7	31,6	21,5	25,0	40,1	58,7	84,6	108,5	127,5	<b>874,5</b>
PFD	ET <sub>Evim1</sub>	267,2	182,8	152,4	92,5	54,2	34,6	42,9	62,4	109,3	157,9	202,1	255,0	<b>1613,5</b>
	ET <sub>Ecam2</sub>	230,0	157,5	129,4	79,0	45,8	28,4	36,0	52,6	93,2	136,8	174,3	221,2	<b>1384,3</b>
	ET <sub>Ecam3</sub>	251,2	172,3	142,1	86,4	50,3	31,7	39,7	58,0	102,5	149,4	190,9	241,3	<b>1515,9</b>
	ET <sub>Ecam4</sub>	215,4	149,1	122,6	74,8	43,4	27,0	34,1	49,9	87,9	129,1	164,1	207,0	<b>1304,4</b>
	ET <sub>Ecam5</sub>	262,8	178,1	147,9	89,2	51,9	33,1	41,1	60,0	106,1	154,1	198,1	251,1	<b>1573,7</b>
	ET <sub>Past</sub>	136,8	103,2	85,0	51,3	30,2	19,0	23,2	34,4	58,2	84,3	108,8	130,2	<b>864,7</b>



# 5. Evapotranspiración



# 5. Evapotranspiración

Establecer una metodología sencilla para la estimación de los coeficientes de cultivo de las especies forestales a fin de cuantificar la evapotranspiración de los distintos cultivos evaluados.

- Mayor consumo de agua de forestaciones frente a pastizales en ambos sitios de estudio.
- Sin limitaciones hídricas, estas forestaciones alcanzan valores de evapotranspiración muy superiores al agua proveniente de las lluvias.
- ET en pastizales inferiores a precipitación media (875 mm en EEC y 865 mm en PFD), pero 100 mm por encima de los valores esperables para estas zonas.

# 5. Evapotranspiración

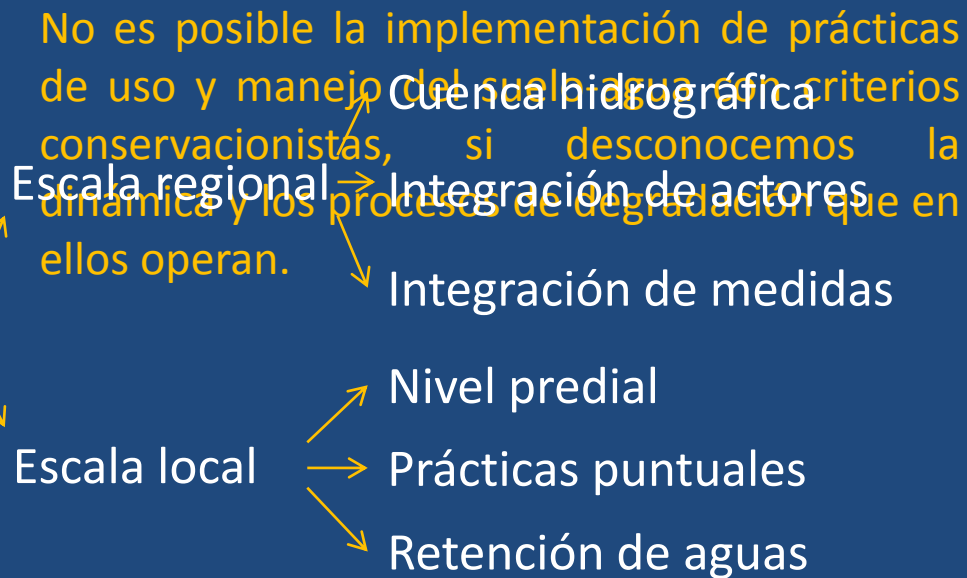
Si se acepta que los sitios de estudio poseen características climáticas comparables, el rodal de pino presenta un menor rendimiento hídrico (descarga freática) frente a los de eucalipto y, dentro de estos, que el rendimiento hídrico de los rodales de *E. viminalis* superará a los de *E. camaldulensis*.

- ✓ Se verifica la hipótesis de que el lote de pino presentan rendimientos hídricos inferiores al de *E. viminalis* en EEC.
- ✓ Se rechaza la hipótesis de que el lote de *E. viminalis* presenta rendimientos hídricos superiores a los de *E. camaldulensis* en PFD.

# 6. Consideraciones finales

Las estructuras clásicas del manejo de cuencas entran en desuso en los sistemas llanos  
Pautas o criterios para escoger medidas de manejo acordes a la problemática local

1. Diagnóstico temprano
2. Desarrollo y mantenimiento de estudios de tipo multidisciplinarios
3. Escala de trabajo en función de los recursos y capacidades disponibles.



# 6. Consideraciones finales

## Medidas para el manejo del agua (Escala local)

Aumento del volumen acumulado en los terrenos bajos.

- Bordos forestados.

Fijación de estos bordos, aumento de la infiltración de agua en el perfil y reducción de la evaporación del agua almacenada.

- Canales o pequeñas lomadas forestadas, transversales a la pendiente.

Se manejan los escurrimientos de campos vecinos y propios (retardo e infiltración).

- Cortinas como el sistema agroforestal más promisorio.

Alto beneficio económico, ambiental y paisajístico, con o sin cultivos protegidos y aprovechamiento maderero.



# 6. Consideraciones finales

## Medidas para el manejo del agua (Escala local)

- Podas y raleos en macizos. **Reducción de la capacidad de intercepción para evitar descensos locales pronunciados del nivel freático en años secos.**
- Pino y eucaliptus como biodrenajes . **Buen resultado en diversos países para el control de inundaciones, salinización del suelo y elevación de la superficie freática.**
- Plantaciones con bajas densidades. **Alternativa de bajo impacto.**

# 6. Consideraciones finales

**Situación actual en PFD  
y pautas de manejo**

**Situación actual en EEC  
y pautas de manejo**

# 7. Conclusiones

- Sus canopeas determinan altos porcentajes de intercepción.
- Reducen el escurrimiento superficial sin llegar a anularlo.
- Facilitan la infiltración de agua en el suelo.
- Manifiestan un elevado consumo de agua frente a la situación natural.
- La existencia de un acuífero libre superficial constituye un aporte de agua extra para las forestaciones.
- Revelan un uso activo de agua freática con depresiones de más de 2 m.
- Capacidad de convertir sitios naturales de recarga en sitios de descarga neta.

Gracias por su atención!

Sebastián I. Besteiro  
sebabesteiro@gmail.com