

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TASA DIARIA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA UNA MACRÓFITA

CORRELACIÓN CON FÓRMULAS DE USO HABITUAL

Carlos Marcelo Scuderi

Ingeniero Civil – Master en Recursos Hídricos

Docente de Recursos Hídricos III - Departamento de Hidráulica

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario



CONTENIDO:

- **INTRODUCCIÓN**
- **OBJETIVOS**
- **ESTADO DEL ARTE**
- **MATERIALES y MÉTODOS**
- **RESULTADOS**
- **CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES**
- **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN SUGERIDAS**

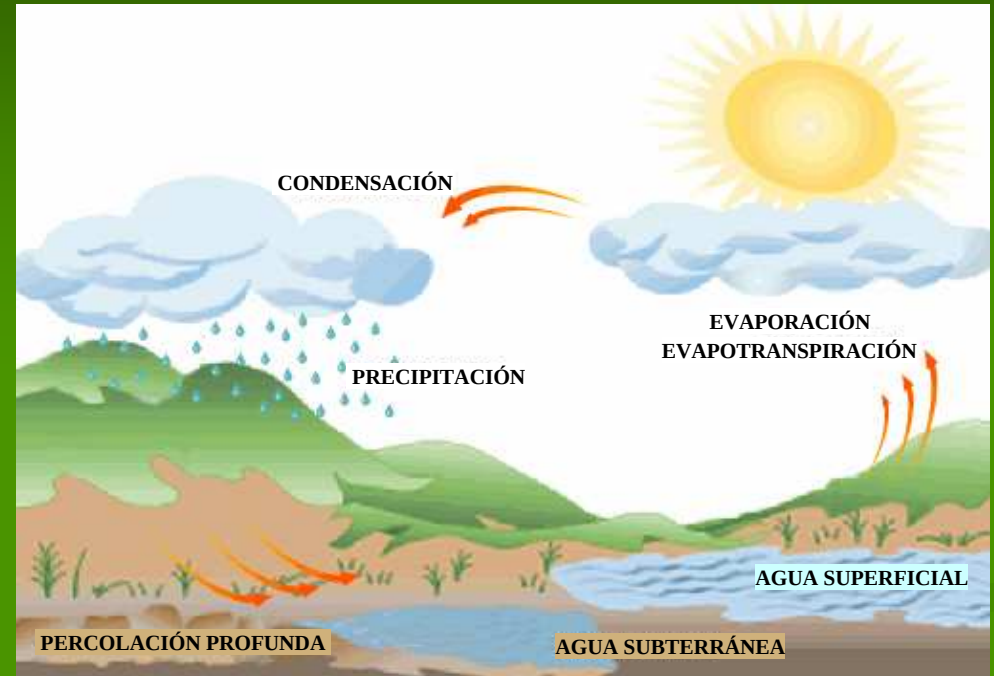
INTRODUCCIÓN:

- ✓ EVAPORACIÓN: COMPONENTE DEL CICLO HIDROLÓGICO

- ✓ EVAPORACIÓN

RADIACIÓN
TEMPERATURA
VIENTO
HUMEDAD
SUP. EVAPORANTE

- ✓ EVAPORACIÓN EN VEGETACIÓN: FACTORES BIOLÓGICOS



TRANSPIRACIÓN



EVAPORACIÓN



EVAPOTRANSPIRACIÓN

INTRODUCCIÓN:



WASTELANDS (Gasca-Tucker et al., 2007)

- materia prima para combustibles
- pastoreo / forraje
- elementos para la construcción
- extracción de madera
- comida y transporte
- conversión para agricultura intensiva

ANTES

RIÑONES DE LA NATURALEZA

(Mitsch e Gosselink, 1986 y 2000)

- mitigación de inundaciones
- recarga de acuíferos
- protección de márgenes
- tratamiento de efluentes
- refugios de flora y fauna

AHORA

INTRODUCCIÓN:

- ✓ EL HIDROPERÍODO ES CONSIDERADO LA FUNCIÓN QUE DIRIGE TODOS LOS PROCESOS Y PATRONES BIOLÓGICOS OBSERVADOS EN LOS BAÑADOS.
- ✓ EL CONOCIMIENTO DE LA TASA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UN BAÑADO Y DE SU INFLUENCIA SOBRE EL COMPORTAMIENTO EN LOS NIVELES NO ES CONCLUYENTE.
- ✓ “LA PRESENCIA DE VEGETACIÓN EN BAÑADOS INCREMENTA O DISMINUYE LA PÉRDIDA DE AGUA DE UN CUERPO ABIERTO DE AGUA?” (Mitsch e Gosselink, 1986)
- ✓ CUÁNTA AGUA EVAPOTRANSPIRA DIARIAMENTE UNA MACRÓFITA ACUÁTICA SOMETIDA A CONDICIONES METEOROLÓGICAS PARTICULARES?
- ✓ PARA INVESTIGAR SOBRE EL TEMA SE PROPUSO LLEVAR A CABO UN EXPERIMENTO PARA MEDIR LA TASA DIARIA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (EVT) DE UNA MACRÓFITA ACUÁTICA EN PARTICULAR EMPLEANDO TANQUES ENTERRADOS

OBJETIVOS:

- ✓ ESTIMAR EXPERIMENTALMENTE LA TASA DIARIA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (EVT) PARA LA MACRÓFITA ACUÁTICA “*ZIZANIOPSIS BONARIENSIS*” BAJO LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS PARTICULARES DE UN LUGAR ESPECÍFICO (CIUDAD DE PORTO ALEGRE);
- ✓ ESTUDIAR EL GRADO DE CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE LOS VALORES DE EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIDOS, Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS REGISTRADAS EN UNA ESTACIÓN AUTOMÁTICA EMPLAZADA EN LAS CERCANÍAS;
- ✓ TESTEAR FÓRMULAS DE USO COMÚN EN CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN CON LOS VALORES MEDIDOS E IMPLEMENTAR UN CRITERIO DE SELECCIÓN PARA DETERMINAR CUÁL DE ELLAS ES LA QUE MEJOR DESCRIBE EL PROCESO EN ESTUDIO.

ESTADO DEL ARTE:

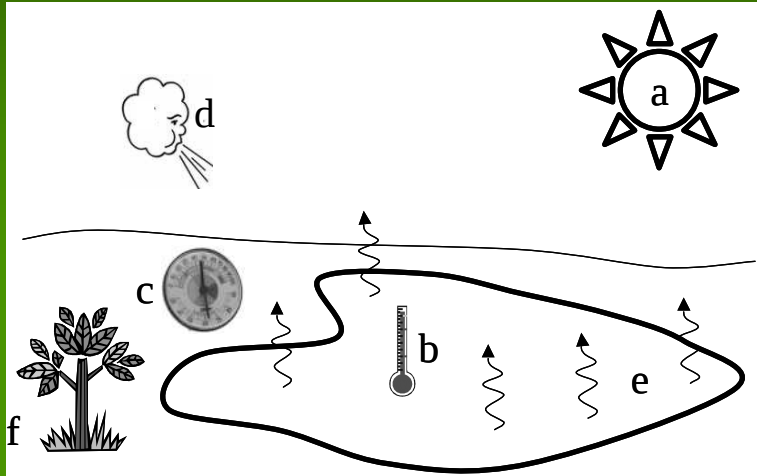


EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL o EFECTIVA: pérdida de agua hacia la atmósfera por evaporación y transpiración bajo las CONDICIONES EXISTENTES de factores atmosféricos y de humedad del suelo (Gangopadhyaya et al., 1966).

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL:
(Thornthwaite, en la década de 1940)

**SUPERFICIE EXTENSA CON VEGETACIÓN
CRECIMIENTO ACTIVO
COBERTURA TOTAL DEL TERRENO
SIN DÉFICIT DE HUMEDAD**

ESTADO DEL ARTE: Variables intervinientes en la evaporación



a) Radiación: principalmente del sol. Depende de la época del año, latitud, altitud y del tipo de terreno.

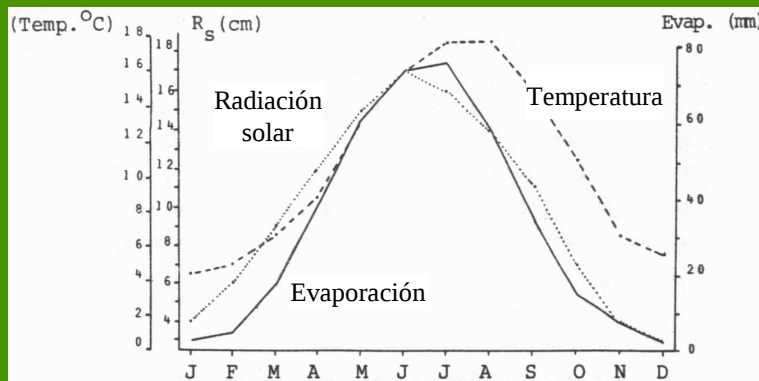
b) Temperatura del aire: asociada con la anterior.

c) Humedad: contenido de agua presente en el aire. La diferencia de presión de vapor de agua entre la superficie evaporante y la capa de aire cercana es un factor determinante en la remoción del vapor.

d) Viento: renueva la capa de aire cercana a la superficie evaporante.

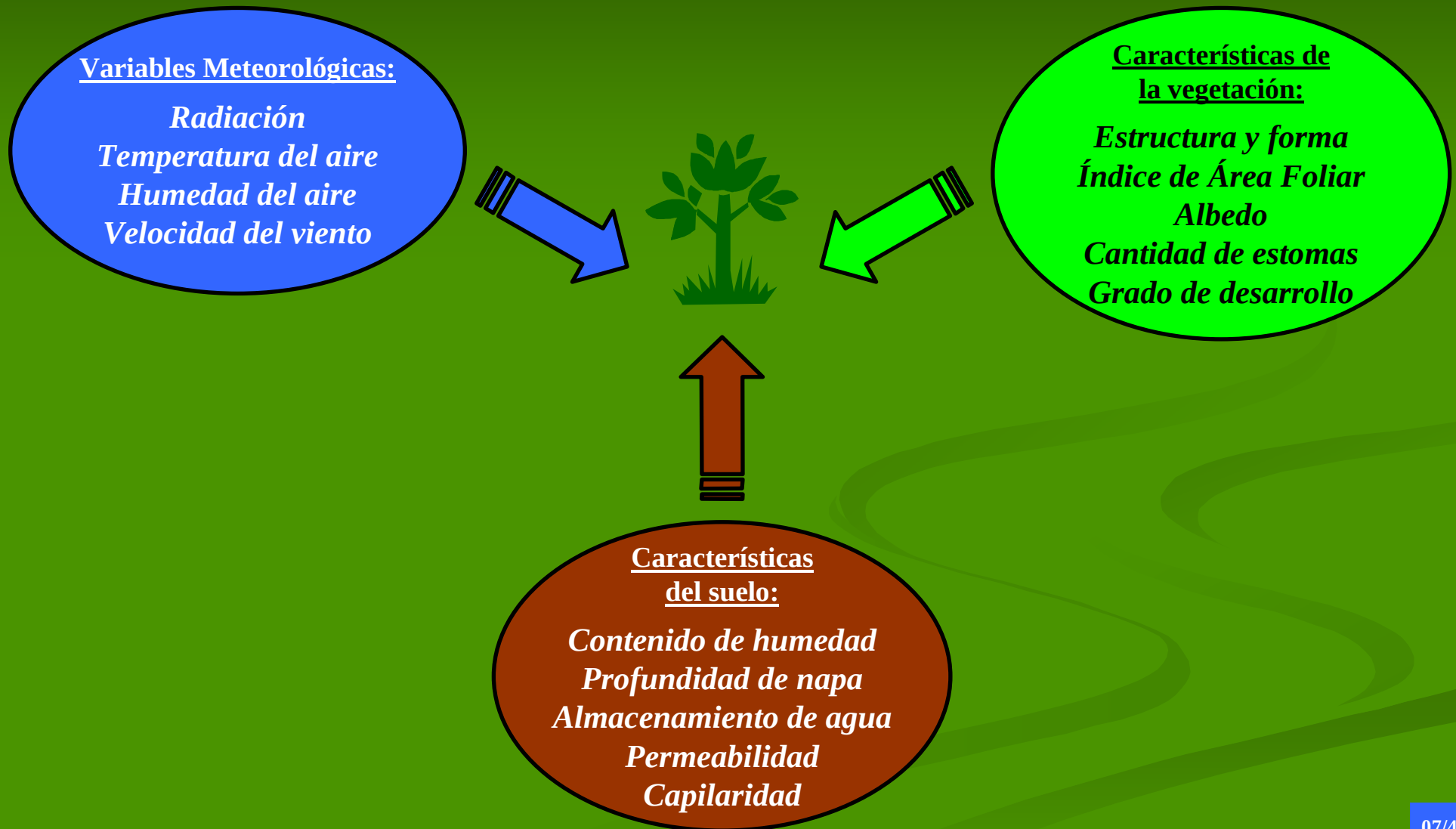
e) Superficie evaporante: en el borde se tiene mayor evaporación por la difusión lateral. Dentro de la masa de aire que se halla encima de la superficie evaporante existen diferencias en el contenido de humedad.

f) Otros: presión barométrica, olas en la superficie del agua, almacenamiento de calor, impurezas, contenido de sales.



(Fuente: Berlato y Molion, 1981, p. 9)

ESTADO DEL ARTE: Variables intervinientes en la transpiración



ESTADO DEL ARTE: Variables intervinientes en la evapotranspiración

Comunidades de plantas (Larcher, 1986)

- ❑ EVT proporcional a la masa verde
- ❑ el microclima generado en la comunidad puede restringir el consumo de agua

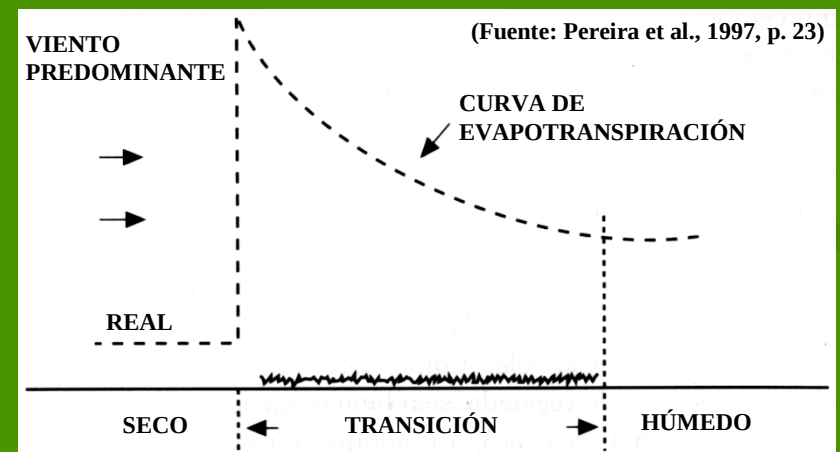
Vegetación dispersa: (Allen et al., 1998)

- ❑ plantas pequeñas predomina E (IAF < 2 , E del orden de 50%)
- ❑ plantas desarrolladas predomina T (IAF > 4 , E del orden de 5%)

ADVECCIÓN: transporte horizontal, por acción del viento, de una propiedad atmosférica (calor sensible). (Pereira et al., 1997)

a) Efecto “TENDEDERO”: se desarrolla en el borde del área vegetada por turbulencias debido a la altura de la vegetación.

b) Efecto “OASIS”: se desarrolla en el interior del área vegetada, región húmeda rodeada por un área seca.



La estimativa, medición y predicción de la pérdida de agua por evapotranspiración son afectados en modo complejo por la multiplicidad de factores meteorológicos, características del suelo y de la vegetación; cada uno de los cuales varía en función del tiempo y del lugar (Gangopadhyaya et al., 1966).

ESTADO DEL ARTE: Metodologías de medición para evapotranspiración

- ✓ Enfoques basados en principios físicos, fisiológicos y ecuaciones empíricas (Berlato y Molion, 1981).

Métodos directos:

- . lisímetros
- . balance hídrico del suelo
- . tanque clase A

Fórmulas Empíricas:

- . temp: Thornthwaite, Blaney-Criddle
- . radiación: Makkink, Turc, Hargreaves

Métodos Combinados

(energía + aerodinámico):

- . Penman
- . Penman-Monteith
- . Penman FAO
- . Shuttleworth-Wallace

- ✓ Las estimativas confiables son pocas y de difícil obtención (Pereira et al., 1997).
- ✓ Instalaciones, equipamientos de alto costo y largos períodos de medición.
- ✓ Personal técnico y científico capacitado.
- ✓ Mayor precisión del método implica una mayor demanda de datos.

La disponibilidad de datos condiciona el uso del método de cálculo.

ESTADO DEL ARTE: Evapotranspiración en bañados

BAÑADOS: “...áreas de transición localizadas entre sistemas terrestres y acuáticos donde el nivel de la freática usualmente se halla sobre o cerca de la superficie, o donde los suelos se encuentran cubiertos por aguas poco profundas...” (U.S. Fish and Wildlife Service, 1979).

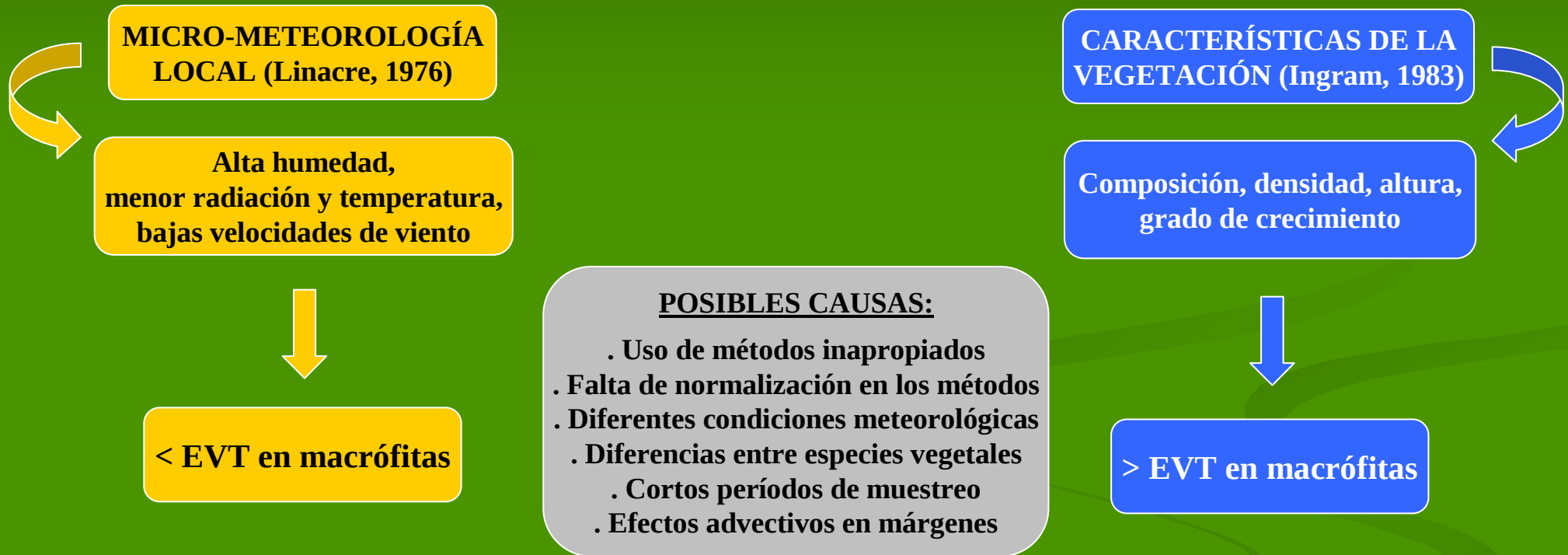
MACRÓFITAS: vegetales visibles a ojo desnudo, cuyas partes fotosintetizantes activas están permanentemente (o por diversos meses), durante todos los años, total o parcialmente sumergidas en agua dulce o salada, pudiendo estar también flotando sobre la misma (Irgang y Gastal Jr., 1996).



- ✓ **Especies:** tirante y calidad del agua, textura y permeabilidad del suelo, pendiente del terreno, escurrimiento superficial, competitividad, viento, luz, temperatura y acción humana.
- ✓ **Evapotranspiración:** mayor pérdida de agua y ligada a la vegetación → el conocimiento de T es sustancial.
- ✓ **No hay un único método recomendado:** balance de agua (errores), lisímetro (recomendable), transferencia de masa (empírico), balance de energía (costoso), ecuaciones basadas en datos meteorológicos (representatividad).
- ✓ **PENMAN-MONTEITH:** en bañados pequeños con vegetación heterogénea las hipótesis de Penman **ÁREA EXTENSA** y **VEGETACIÓN UNIFORME** no se cumplen. El movimiento del aire y el intercambio de vapor entre vegetación y capa atmosférica presenta dos y tres dimensiones.

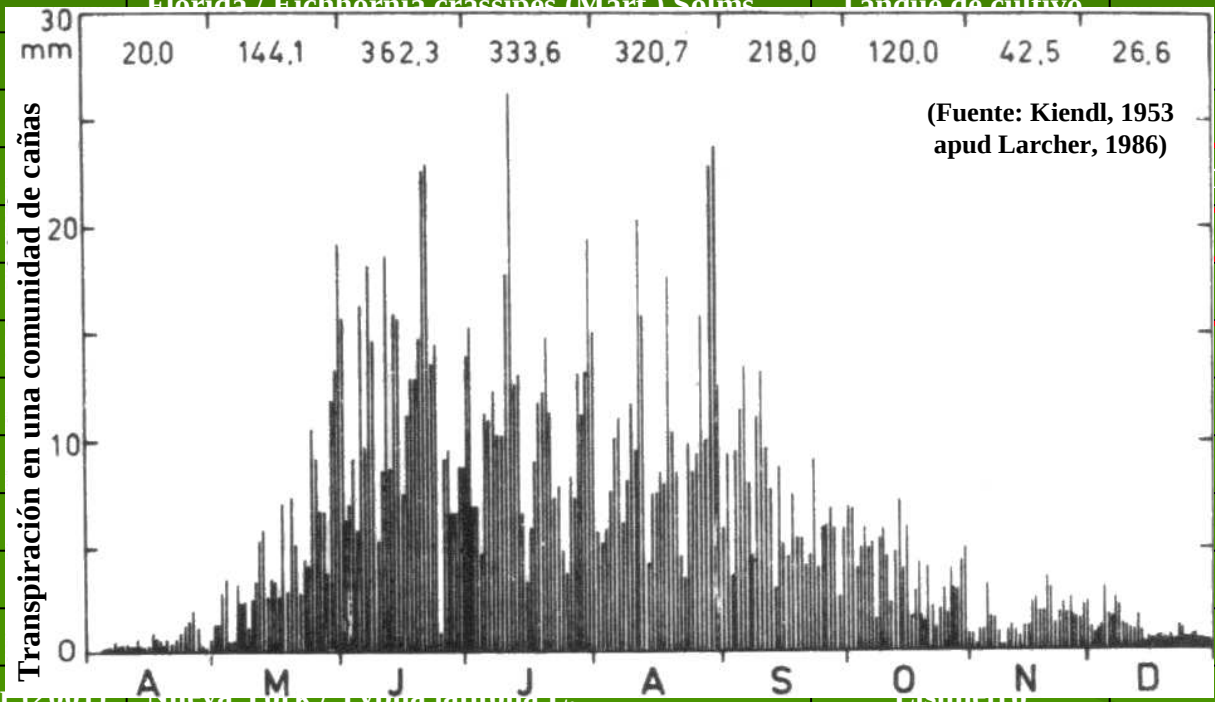
ESTADO DEL ARTE: Evapotranspiración en bañados

Dos teorías contrapuestas respecto del consumo de agua en bañados y lagos



En general medidas basadas en lisímetros producen relaciones $EVT/E > 1$, mientras que medidas basadas en el balance de energía o métodos aerodinámicos producen valores de $EVT/E < 1$.

ESTADO DEL ARTE: Tasas de EVT en bañados halladas en la literatura

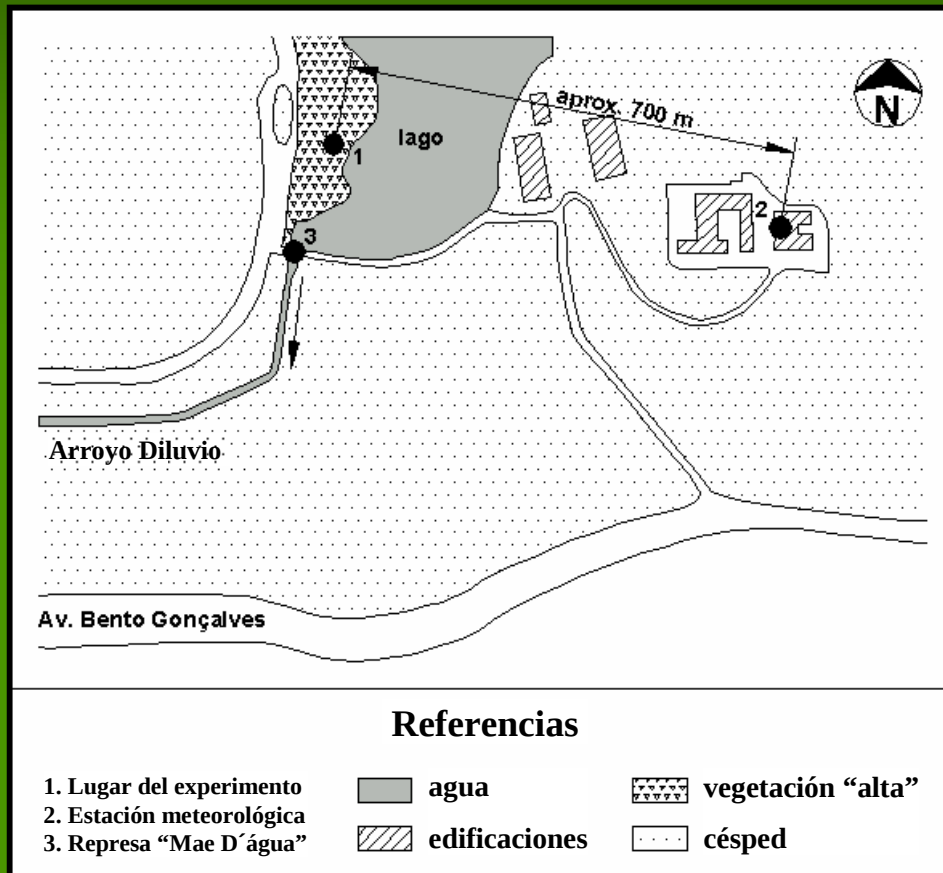
Fuente	Lugar / Vegetación	Metodología	EVT (mm.dia ⁻¹)	EVT/E
Timmer e Weldon (1967)	Florida / water hyacinth	Tanque de cultivo	14,4	3,7
DeBusk et al. (1983)	Florida / <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms	Tanque de cultivo	7,5	1,7
Dolan et al. (1984)			3,3	0,7
Boyd (1987)			6,6	1,6
Lallana et al. (1987)			19,6	2,7
Snyder e Boyd (1987)			7,1	1,5
Koerselman e Beltman			2,5	1,7
Sambasiva Rao (1988)			6,4	1,5
Price (1994)			4,8	1,0
Abtew (1996)			3,6	1,0
Rushton (1996)			3,5	0,8
Parkhurst et al. (1998)			3,6	0,8
German (1999)			3,0	0,8
Pauliukonis e Schneider (2001)	Nueva York / <i>Typha latifolia</i> L.	Lisímetro	5,8	2,5
Sánchez-Carrillo et al. (2001)	España / <i>Cladium mariscus</i> (L.) Pohl	Porómetro	7,4	2,3
Mao et al. (2002)	Florida / <i>Cladium jamaicense</i>	Lisímetro	3,7	1,2

La razón EVT/E presenta mucha dispersión ($0,6 < EVT/E < 12,5$)

MATERIALES y MÉTODOS



MATERIALES y MÉTODOS: Lugar del experimento



Lugar: área experimental en la margen de la represa "Mãe D'água" en el IPH (POA, Brasil).

Coordenadas: 30° 04' S y 51° 07' O , altitud 79 m s.n.m.

Clima: templado húmedo sin período seco
temperatura media 19,5 °C
lluvia 1347 mm.año⁻¹ (1961-1990) (INMET, 1992)

Período experimento: 23/06/04 hasta 12/03/05



MATERIALES y MÉTODOS: Equipamientos empleados



2 Tanques de polietileno: profundidad 775 mm
diámetro 1471 mm
superficie 1.70 m²

1 tanque clase A: profundidad 254 mm
diámetro 1210 mm

1 pluviómetro

1 estación meteorológica automática (DAVIS “GroWeather”)

3 sensores transmisores de presión (WIKA “S-10”)

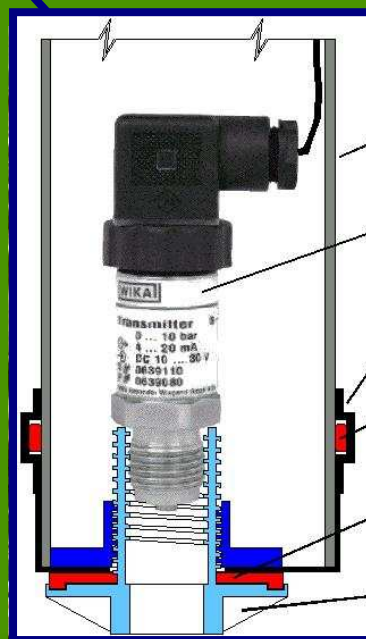
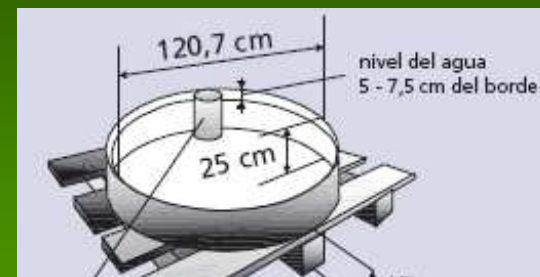
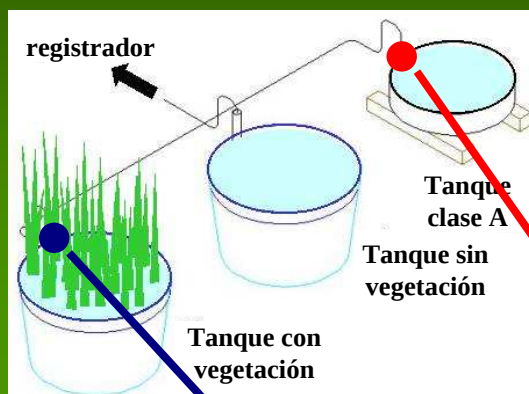
2 sondas de temperatura por inmersión



MATERIALES y MÉTODOS: Vegetación utilizada y esquema del experimento



***“Zizaniopsis bonariensis”* (Bal. & Poitr.) Speg.**
Nombre popular: paja o espadaña
Macrófita acuática emergente
Hojas: entre 1 y 3 m de altura y
10 a 20 mm de ancho



MATERIALES y MÉTODOS: Tratamiento de datos medidos

Niveles: desde 23/06/04 hasta 12/03/05 , diferencia de lecturas registradas a la hora 24 entre dos días consecutivos.

Temperatura: desde 14/10/04 hasta 12/03/05 , un valor medio diario.

Tres series de datos: TCA, CSV, CCV

Dos períodos de análisis: completo y estacional

Correlación entre las diferentes series

Análisis preliminar:

- ☐ Días con precipitación ($P > 0.2 \text{ mm.dia}^{-1}$)
- ☐ Falla eléctrica de los sensores
- ☐ Limpieza de los tanques
- ☐ Desborde de tanques después de una lluvia importante
- ☐ Advección , $EVT/R_n > 1$ (Macquarrie e Nkemdirim, 1991)
- ☐ Datos dudosos
- ☐ Outliers: método box-plot (Montgomery y Runger, 2003)
- ☐ Unificación de las tres series para comparación

Parámetros estadísticos:

- ☐ Valor medio
- ☐ Desvío estándar
- ☐ Coeficiente de variación
- ☐ Intervalo de confianza (dist. t)
- ☐ Valor mínimo
- ☐ Valor máximo
- ☐ Coeficiente de determinación
- ☐ Test F (significancia de R^2)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\Delta \bar{x} = \pm t_{\left(n-1, \frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}$$

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

$$F = \frac{R^2}{(1-R^2)} \cdot \frac{(n-k-1)}{k}$$

MATERIALES y MÉTODOS: Correlación entre EVT y E con datos meteorológicos

Consistencia de datos meteorológicos:

- ☐ Precipitación: registro propio / estación PoA a 6 km (INMET)
- ☐ Temperaturas del aire: $T_{\max} > T_{\text{med}} > T_{\min} > T_{\text{roc}}$
- ☐ Radiación solar: contraste con R_{so} (empírico) $\longrightarrow$
- ☐ Humedad relativa: observación gráfica de la tendencia
- ☐ Presión atmosférica: observación gráfica de la tendencia
- ☐ Velocidad del viento: observación gráfica de la tendencia

$$R_{\text{so}} = (0,75 + 0,00002 \cdot z) \cdot R_a$$

Modelos de correlación empleados:

- Regresión Lineal Simple (RLS)
- Regresión Lineal Múltiple (RLM)
- Función objetivo: mínimos cuadrados

$$ET_i' = a \cdot VC_i + b$$

$$ET_i' = a \cdot VC1_i + b \cdot VC2_i + c$$

Parámetros de evaluación del ajuste:

- Raíz del error cuadrático medio
- Coeficiente de determinación
- Test F (Fisher) (significancia del modelo)

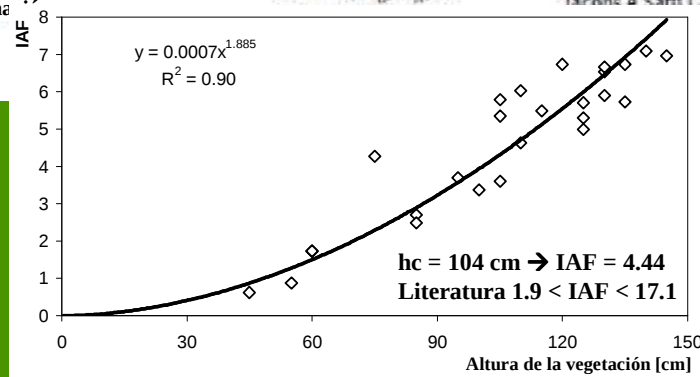
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (ET_i - ET_i')^2}{n - gl}}$$

$$R^2 = \frac{[\sum (ET_i - \overline{ET}) \cdot (ET'_i - \overline{ET'})]^2}{\sum (ET_i - \overline{ET})^2 \cdot \sum (ET'_i - \overline{ET'})^2}$$

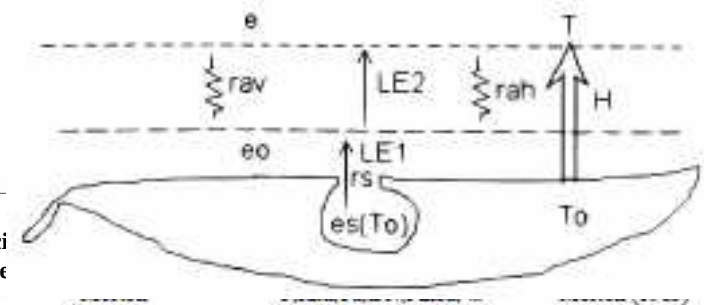
$$F = \frac{\sum (ET_i' - ET)^2}{\sum (ET_i - ET_i')^2} (n - gl)$$

MATERIALES y MÉTODOS: Estimativa de EVT y E a través de fórmulas de uso común

Clasificación	Fórmula	Variables necesarias	Fuente
Temperatura	Blaney-Criddle	T, p, URmin, n/N	Doorenbos e Pruitt (1977)
	Blaney-Morin	T, URmed, p.	Duru (1984)
	Camargo	Rext, T	Camargo e Camargo (2000)
	Hamon	T, Ld	Oudin et al. (2005)
	Hargreaves-Samani	T, Tmax, Tmin, Rext	Jacobs e Satti (2001)
	Ivanov	T, URmed	Dorfinan (1977)
	Linacre	T, Td, Lat, Alt	Berlato e Molion (1981)
	McCloud	T	Jacobs e Satti (2001)
	McGuinness-Bordne	Rext, T	Oudin et al. (2005)
	Romanenko	T, Td	Oudin et al. (2005)
Déficit de saturación del aire	Thornthwaite	T, Tu	Pereira e Pruitt (2004)
	DeBruin	T, Td, U	de Bruin (1978)
	Lungeon	T, Td, Pmed	Zimmermann (2000)
	Meyer	T, Td, U	Zimmermann (2000)
	Papadakis	Tmax, Tmin	Winter et al. (1995)
	Transporte de massa	T, Td, U	Winter et al. (1995)
Combina	URSS	T, Td, U	Zimmermann (2000)
	Penman (varías)	T, Rad, Td, n/N, U, Pmed, Tmax, Tmin, Ra, URmax, URmed, U _D , U _N , α	Penman (1948), Berlato e Molion (1981), Allen (2001), Jacobs e Satti (2001)



Clasificación	Fórmula	Variables necesarias	Fuente
Radiación	$ET = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta \cdot (Rn - G) + \frac{86400 \cdot \rho \cdot cp \cdot (es - ed)}{r_a}}{\Delta + \left[\gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]}$		al (2005)
			Satti (2001)
			Molion (1981)
			al (1995)
	DeBruin-Keijman	Rad, T, Td, n/N, α	de Bruin e Holtslag (1982)
Relaci compleme	$r_a = \frac{\ln \left(\frac{z_m - d}{z_{om}} \right) \cdot \ln \left(\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right)}{k^2 \cdot u_z}$		i (2001)
			(1995)
			(1995)
			Brutsaert, 1982)
			al (1995)
Radiación	Priestley-Taylor	Rad, T, Td, Pmed, n/N, α	Berlato e Molion (1981)
	Radição FAO-24	F _o , T, Td, Pmed, U _D	Doorenbos e Pruitt (1977)
	Radição medida	F _c = $\frac{r_1}{0.5 \cdot IAF}$	Tomar e O Toole (1980)
	Radição líquida	Rad, T, Td, n/N, α	de Bruin e Stricker (2000)



albedo α	0,05 (água) ; 0,17 ; 0,23
Plano de desplazamiento del cero d	0,3.hc ; 0,67.hc ; 0,8.hc
Longitud de la rugosidad (momentum) z _{om}	0,1.hc ; 0,123.hc ; 0,3.hc
Longitud de la rugosidad (calor y vapor) z _{oh}	0,01.hc ; 0,02.hc
Resistencia aerodinámica	f (zom ; u) ; f (d ; zom ; zoh ; u)
Resistencia estomática o de hoja	100
Resistencia del follaje	f (r1 ; IAF) ; 5 ; 70 ; 100 ; 180

MATERIALES y MÉTODOS: Estimativa de EVT y E a través de fórmulas de uso común

Criterios de evaluación de las fórmulas (Willmott, 1982):

- ☐ Valor medio de los datos medidos y modelados
- ☐ Desvío estándar de los datos medidos y modelados
- ☐ Pendiente y ordenada al origen de la recta de regresión
- ☐ Error absoluto medio
- ☐ Índice de concordancia
- ☐ Raíz del error cuadrático medio
- ☐ Coeficiente de determinación

Tests estadísticos:

- Test F para verificar si a y b no son estadísticamente diferentes de 1 y 0 respectivamente (Dent e Blackie, 1979).
- Test t para verificar si el valor del error medio es diferente de 0 (Jacovides e Kontoyiannis, 1995).

$$F = \frac{(n-2) \cdot \left[(n \cdot b^2) + 2 \cdot n \cdot \bar{x} \cdot b \cdot (a-1) + \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot (a-1)^2 \right]}{2 \cdot n \cdot RMSE^2}$$

$$t_{MBE} = \frac{MBE}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i - MBE)^2}{n \cdot (n-1)}}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \cdot \sum (x_i - y_i)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{Y}| + |y_i - \bar{Y}|)^2} \right]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{(n-2)}}$$

$$R^2 = \frac{[\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Criterio de ordenamiento (Dorfman, 1977):

Atribuye igual peso a cada estadístico, ordenando para cada uno de ellos las fórmulas evaluadas de menor a mayor en forma correlativa, desde 1 a n.

Fórmula	Estadístico 1	Estadístico 2	Estadístico 3	Suma	Orden
A	1	3	1	5	1º
B	3	2	2	7	3º
C	2	1	3	6	2º

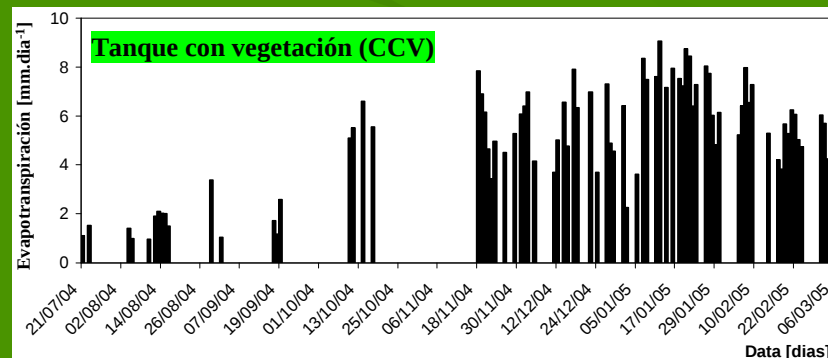
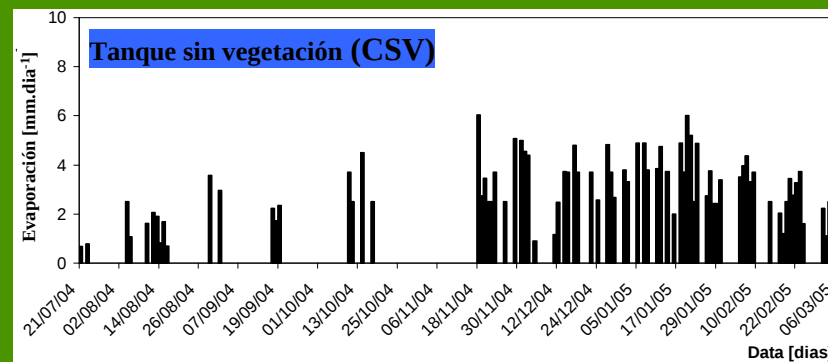
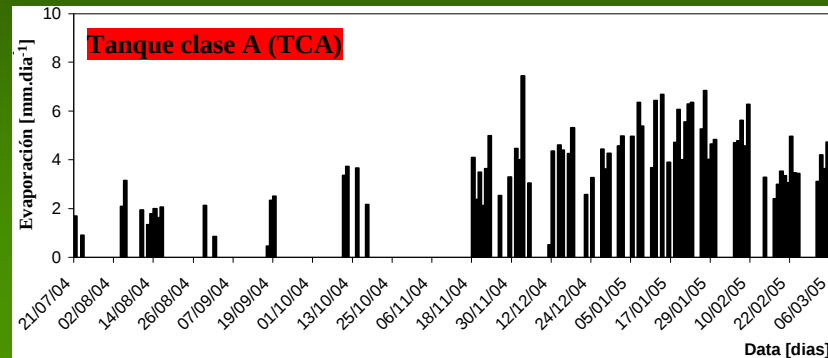
RESULTADOS



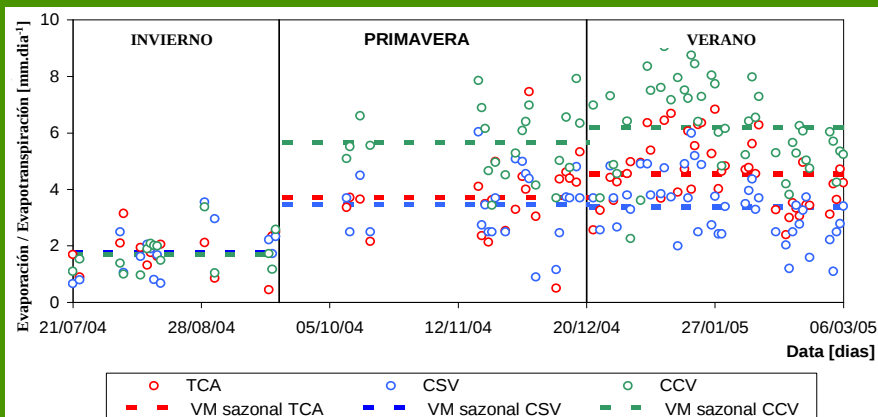
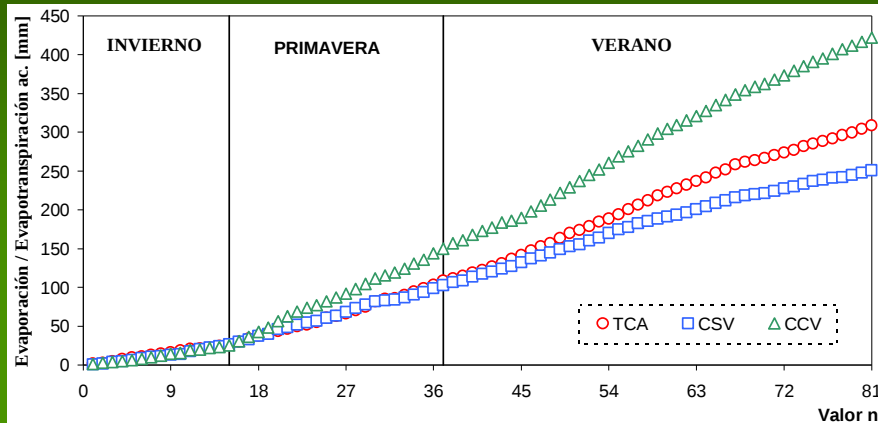
RESULTADOS: Tratamiento de los datos registrados

Item	dias	%
Total de dias com registros	263	100
Dias con precipitación	79	30
Limpieza de tanques	19	7
Falla eléctrica	11	4
Subgrupo 1	154	59
Situaciones con advección	33	13
Falla estación meteorológica	8	3
Situación con $R_n < 0$	5	2
Subgrupo 2	108	41

	TCA	CSV	CCV
Datos dudosos	2	4	8
Dias con outliers	1	3	0
Subgrupo 3	81 (31%)		



RESULTADOS: Tasas de evapotranspiración y evaporación medidas



INVIERNO: diferencia en consumos hasta 6%

PRIMAVERA: diferencia entre VM de TCA y CSV 8%
consumo de la CCV 58% maior

VERANO: VM de TCA 35% mayor que CSV
VM de CCV 84% > que CSV y 36% > que TCA

	x	$\Delta x^{(1)}$	$\Delta x^{(2)}$	S	CV	min	max
período completo (21/07/04 a 06/03/05) – n=81							
TCA	3,81	0,34	0,45	1,55	0,41	0,45	7,45
CSV	3,10	0,28	0,37	1,27	0,41	0,67	6,04
CCV	5,21	0,48	0,63	2,16	0,42	0,97	9,05
invierno (21/07/04 a 19/09/04) – n=15							
TCA	1,79	0,38	0,53	0,69	0,39	0,45	3,15
CSV	1,77	0,48	0,67	0,87	0,49	0,67	3,56
CCV	1,69	0,37	0,52	0,67	0,39	0,97	3,38
primavera (10/10/04 a 18/12/04) – n=22							
TCA	3,72	0,61	0,83	1,38	0,37	0,51	7,45
CSV	3,46	0,57	0,78	1,29	0,37	0,90	6,04
CCV	5,66	0,55	0,74	1,23	0,22	3,44	7,92
verano (22/12/04 a 06/03/05) – n=44							
TCA	4,55	0,34	0,45	1,18	0,26	2,40	6,83
CSV	3,37	0,35	0,46	1,09	0,32	1,11	6,00
CCV	6,19	0,46	0,61	1,56	0,25	2,26	9,05

x: valor medio, Δx : intervalo de confianza, S: desvío estándar, CV: coeficiente de variación, min: valor mínimo, máx: valor máximo, (1) 95% de confianza, (2) 99% de confianza

Tasa diaria de EVT (CCV) = $5,2 \pm 0,5$ mm

Tasa diaria de E (TCA) = $3,8 \pm 0,3$ mm

Tasa diaria de E (CSV) = $3,1 \pm 0,3$ mm

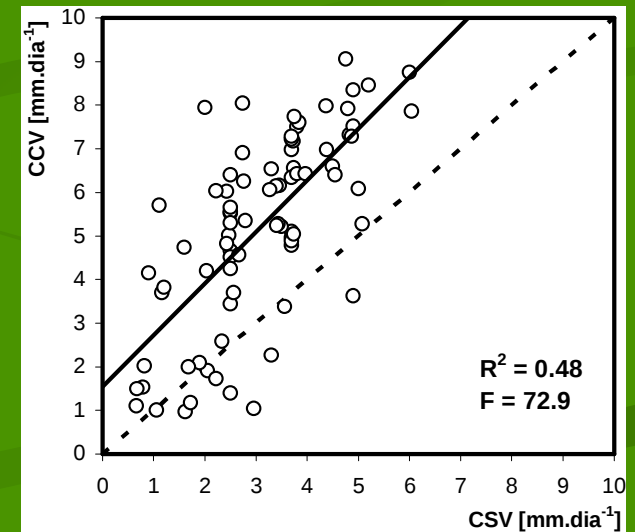
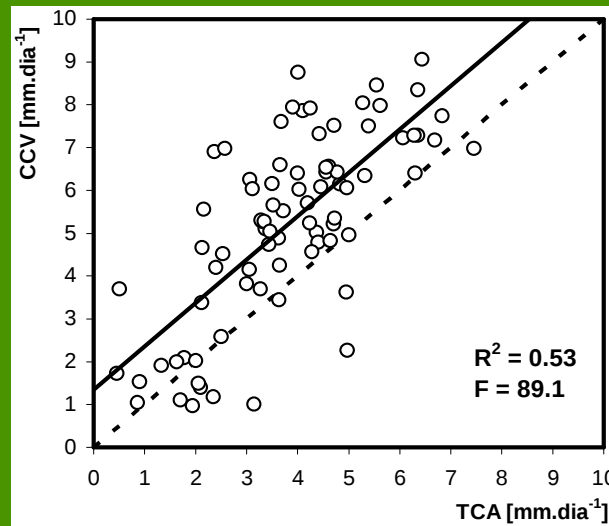
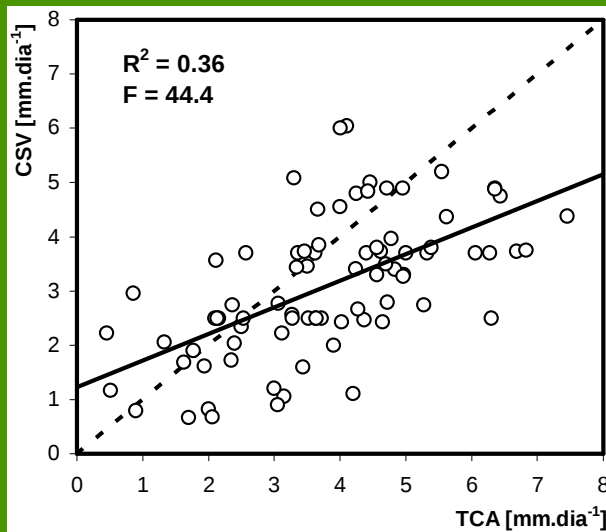
RESULTADOS: Tasas de evapotranspiración y evaporación medidas

Relaciones entre consumos de agua en los tanques

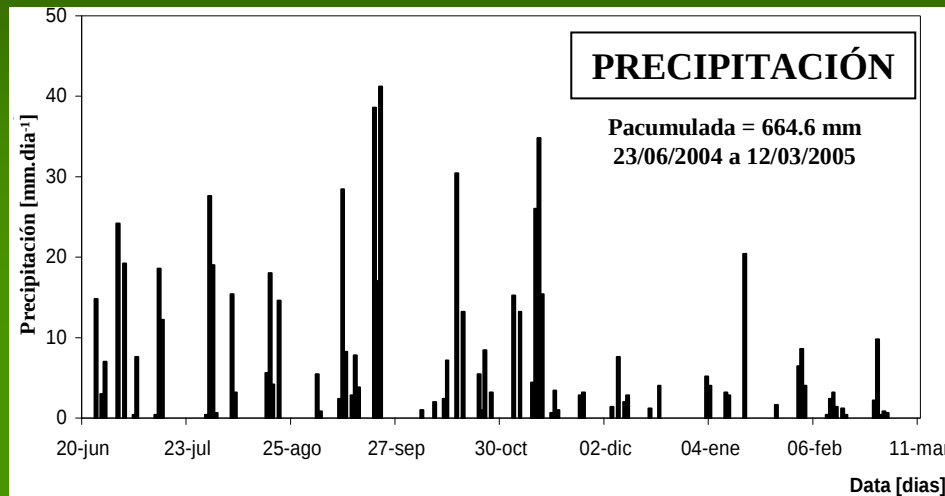
Período	n	CCV/TCA	CCV/CSV	CSV/TCA
completo (21/07/04 a 06/03/05)	81	1,37	1,68	0,81
invierno (21/07/04 a 19/09/04)	15	0,95	0,96	0,95
primavera (10/10/04 a 18/12/04)	22	1,52	1,64	0,93
verano (22/12/04 a 06/03/05)	44	1,36	1,84	0,74

En la literatura
EVT/E desde 0,6 hasta 12,5

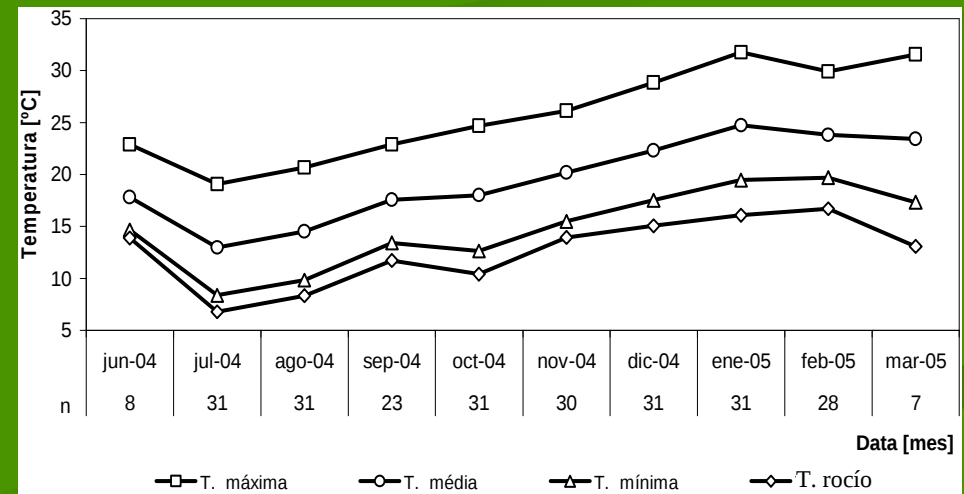
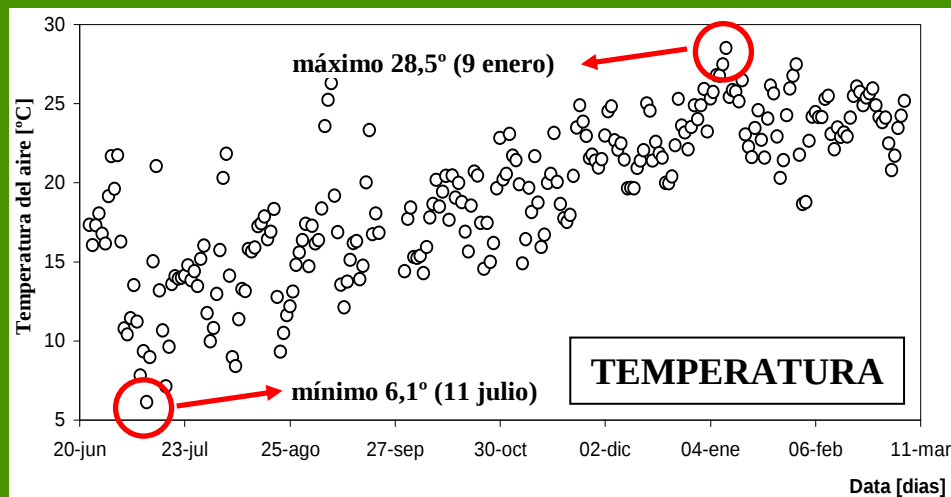
Correlaciones entre los diferentes tanques



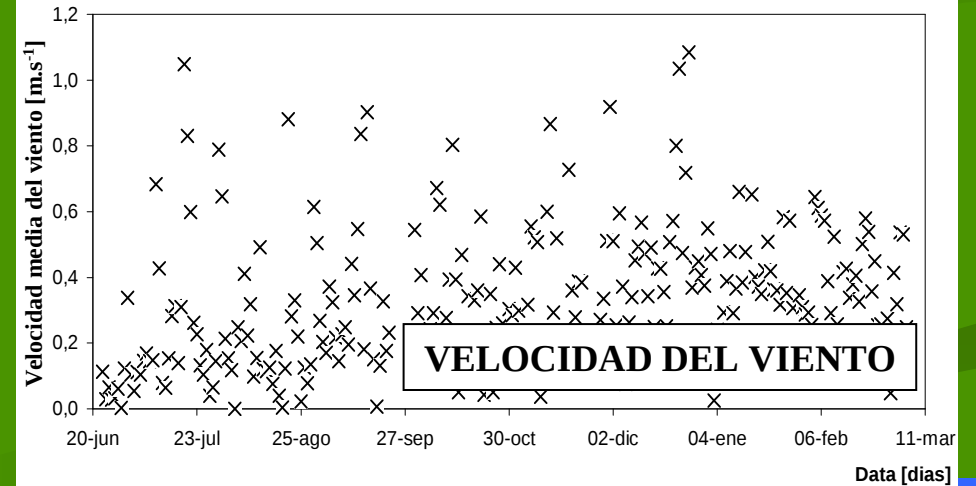
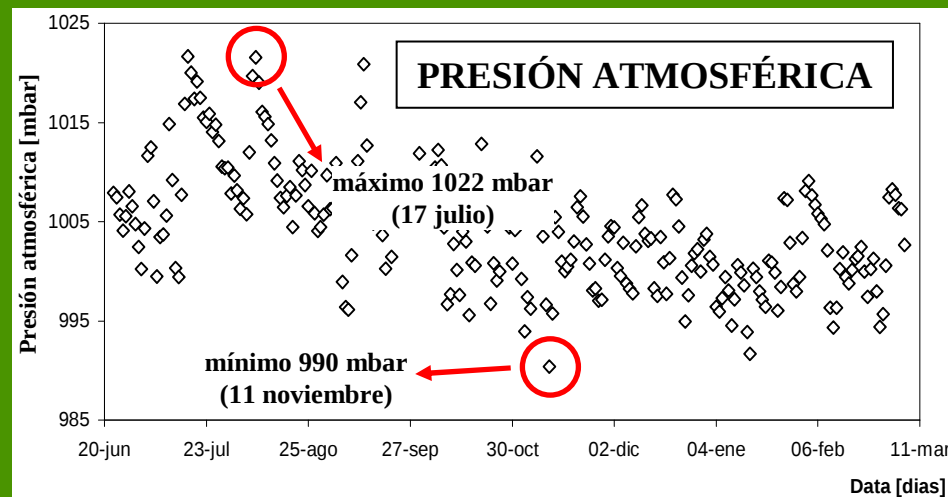
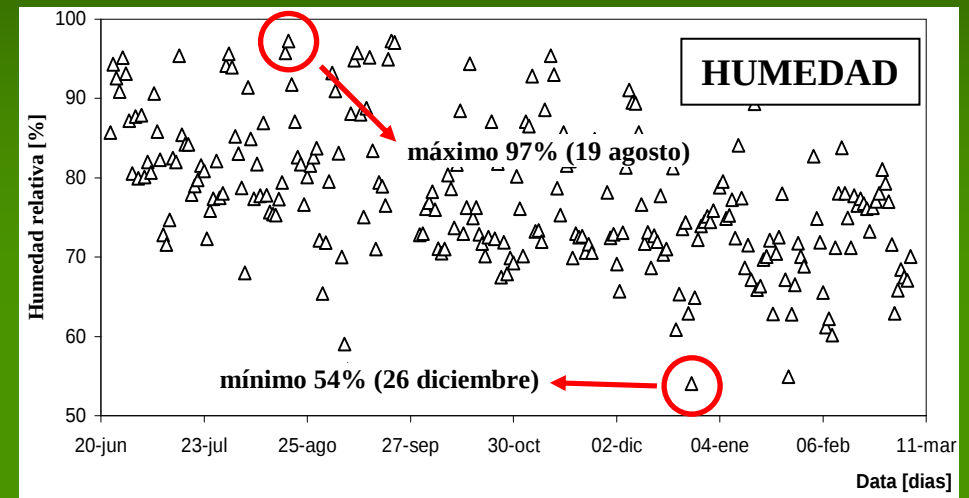
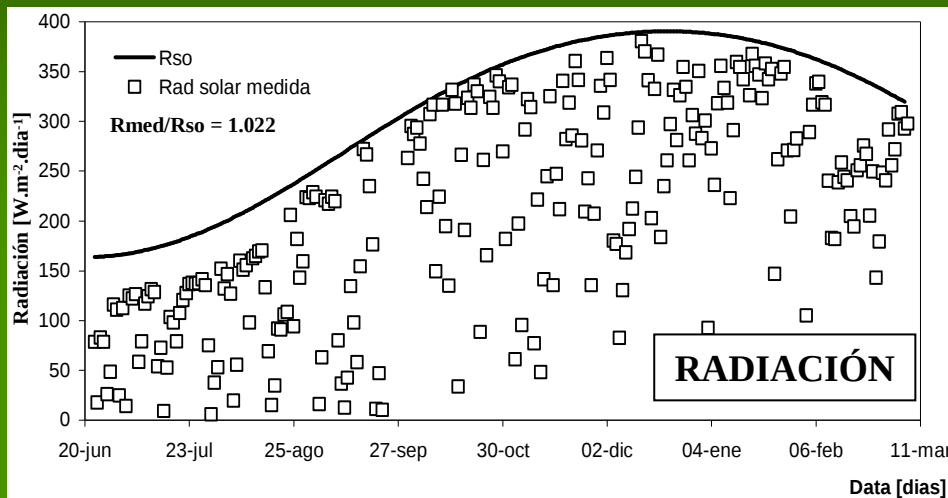
RESULTADOS: Consistencia de variables meteorológicas



Mes	Estación meteorológica [mm]	PoA INMET [mm]
Junio/2004	97,4	97,4
Julio/2004	129,6	137,6
Agosto/2004	61,6	38,4
Setiembre/2004	156,4	142,0
Octubre/2004	74,2	62,8
Noviembre/2004	120,0	0,0
Diciembre/2004	19,0	18,4
Enero/2005	37,2	28,8
Febrero/2005	41,2	30,3
Marzo/2005	119,4	135,6
TOTAL	856,0	691,3



RESULTADOS: Consistencia de variables meteorológicas



RESULTADOS: Resumen de variables meteorológicas

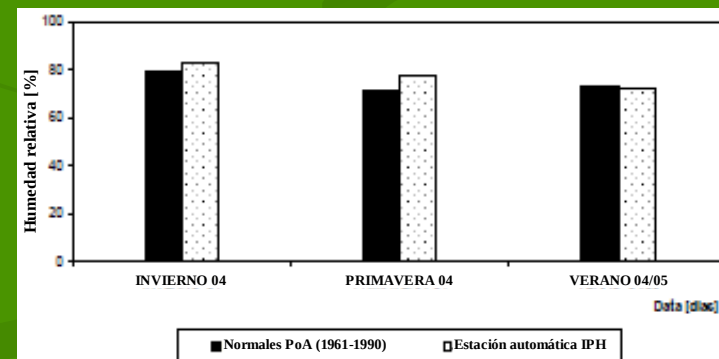
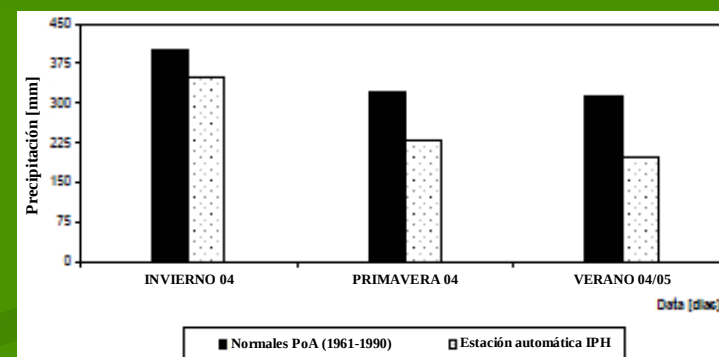
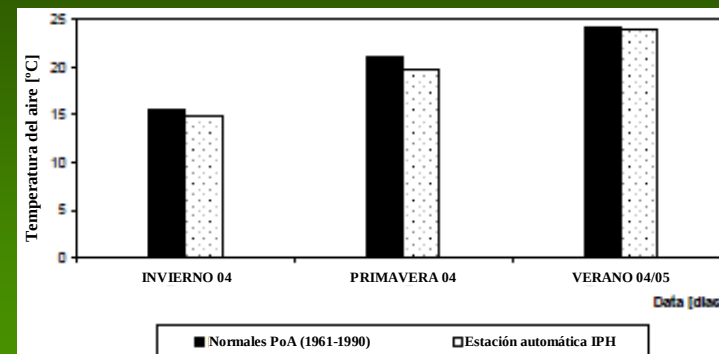
Variables meteorológicas medias diarias medidas

	n	Temp. media [°C]	Precipitación [mm]	Radiación [W.m ⁻²]
Periodo	250	19,3 (6,1 / 28,5)	664,6	206,2 (5,6 / 380,6)
Invierno	90	15,0 (6,1 / 26,3)	314,2	114,1 (5,6 / 272,0)
Primavera	84	19,7 (14,3 / 25,0)	271,4	245,6 (9,7 / 380,6)
Verano	76	24,0 (18,6 / 28,5)	79,0	271,6 (58,4 / 367,5)

	n	Presión [mbar]	Humedad [%]	Veloc. Viento [m.s ⁻¹]
Periodo	250	1004,3 (990,4 / 1021,6)	77,9 (54,1 / 97,3)	0,33 (0,00 / 1,08)
Invierno	90	1009,0 (996,1 / 1021,6)	82,5 (55,8 / 97,2)	0,25 (0,00 / 1,05)
Primavera	84	1002,5 (990,4 / 1012,8)	77,8 (65,7 / 97,3)	0,35 (0,04 / 0,92)
Verano	76	1000,8 (991,7 / 1009,1)	72,6 (54,1 / 92,2)	0,42 (0,03 / 1,08)

Normales de la ciudad de PoA (1961-1990)

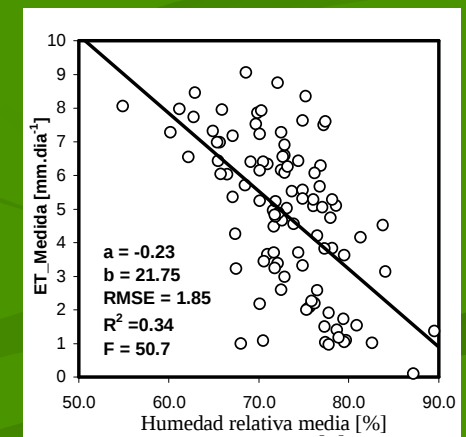
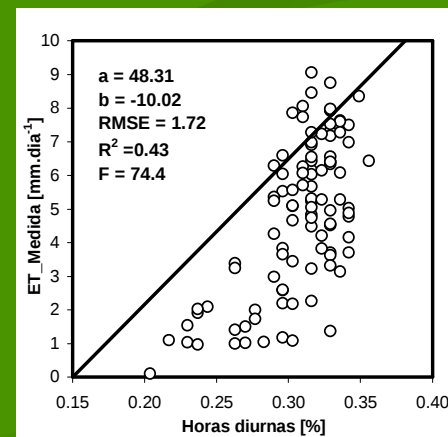
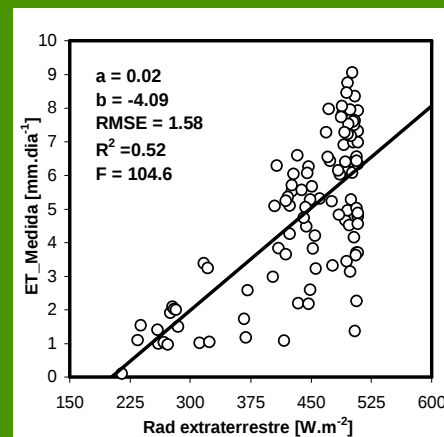
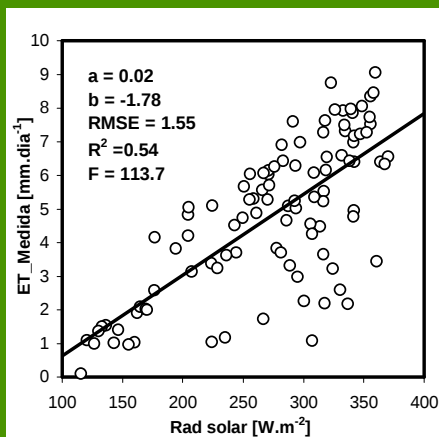
periodo	Temp. media [°C]	Precipitación [mm]	Humedad [%]
Completo	20,3	1034,0	74,7
Invierno	15,5	401,2	79,3
Primavera	21,2	319,7	71,3
Verano	24,1	313,1	73,3



RESULTADOS: Tasas de EVT y de E en función de variables meteorológicas

Regresión lineal simple
CCV (n = 100)

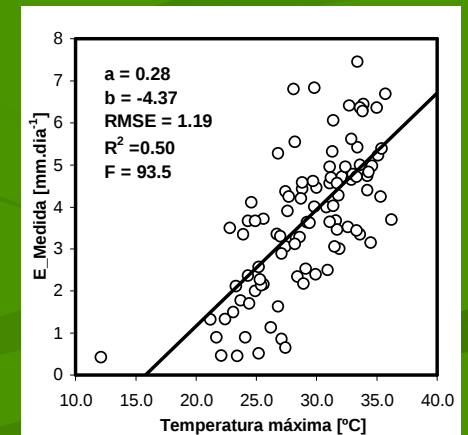
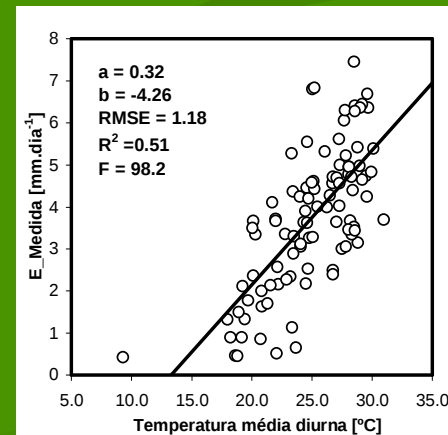
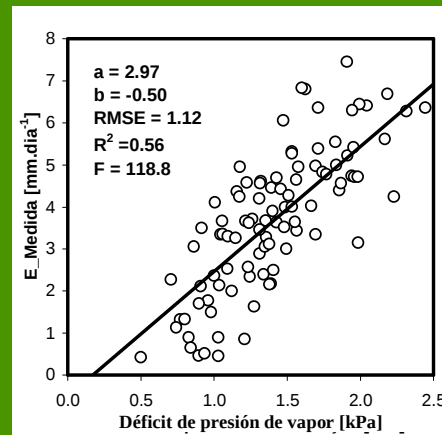
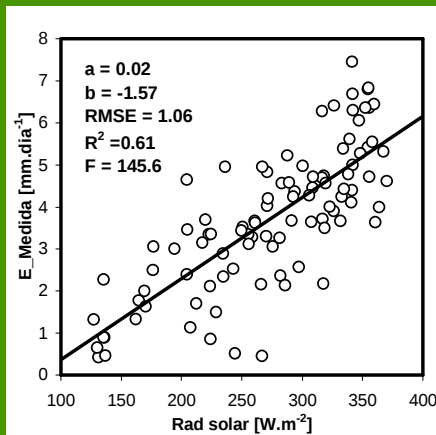
Orden	Variable Meteorológica	a	b	RMSE	R ²	F ⁽¹⁾
1	Radiación solar [W.m ⁻²]	0,02	-1,78	1,55	0,54	113,7
2	Radiación extraterrestre [W.m ⁻²]	0,02	-4,09	1,58	0,52	104,6
3	Horas diurnas [%]	48,31	-10,02	1,72	0,43	74,4
4	Humedad relativa media [%]	-0,23	21,75	1,85	0,34	50,7
5	Temperatura media [°C]	0,33	-2,11	1,89	0,31	44,9
6	Déficit de presión de vapor [kPa]	3,17	0,50	1,89	0,31	44,2
7	Temperatura media diurna [°C]	0,32	-2,94	1,93	0,28	28,7
8	Temperatura mínima [°C]	0,28	0,48	1,94	0,27	36,6
9	Presión atmosférica [hPa]	-0,23	239,70	1,95	0,26	35,1
10	Temperatura máxima [°C]	0,26	-2,64	1,99	0,24	30,2
11	Humedad mínima [%]	-0,12	10,30	2,03	0,21	25,3
12	Velocidad media del viento [m.s ⁻¹]	4,77	3,07	2,10	0,15	16,7
13	Temperatura del punto de rocío [°C]	0,17	2,55	2,17	0,10	10,5
14	Humedad máxima [%]	-0,20	23,36	2,17	0,09	10,0



RESULTADOS: Tasas de EVT y de E en función de variables meteorológicas

Regresión lineal simple
TCA (n = 97)

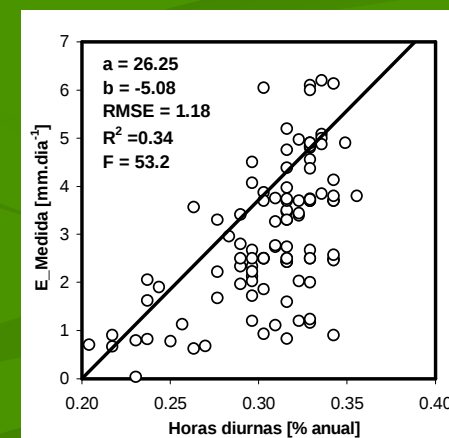
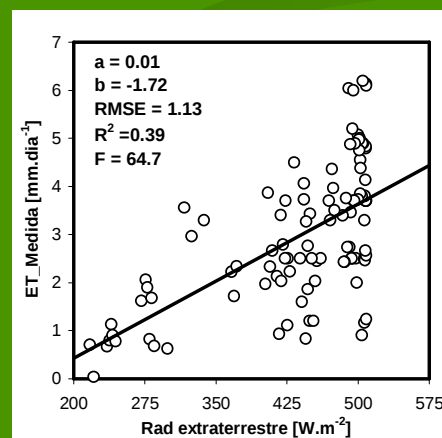
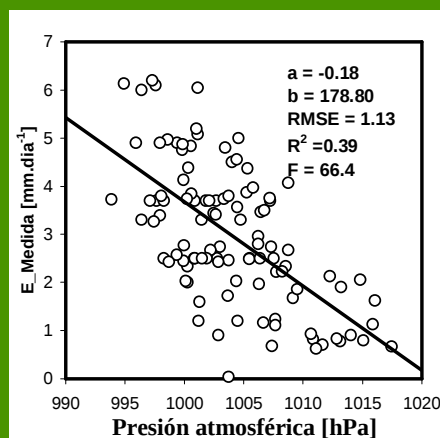
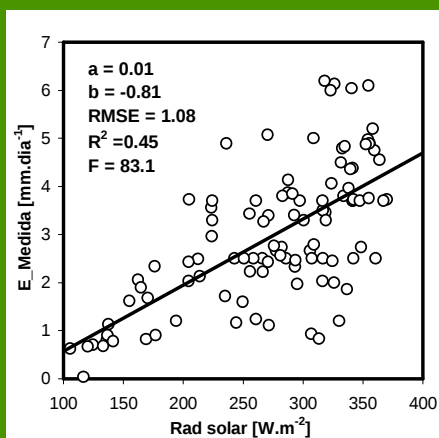
Orden	Variable Meteorológica	a	B	RMSE	R ²	F ⁽¹⁾
1	Radiación solar [W.m ⁻²]	0,02	-1,57	1,06	0,61	145,6
2	Déficit de presión de vapor [kPa]	2,97	-0,50	1,12	0,56	118,8
3	Temperatura media diurna [°C]	0,32	-4,26	1,18	0,51	98,2
4	Temperatura máxima [°C]	0,28	-4,37	1,19	0,50	93,5
5	Temperatura media [°C]	0,30	-2,93	1,21	0,48	88,9
6	Radiación extraterrestre [W.m ⁻²]	0,01	-2,01	1,34	0,37	55,0
7	Horas diurnas [%]	30,21	-5,66	1,39	0,32	44,3
8	Humedad relativa media [%]	-0,15	14,36	1,39	0,31	43,5
9	Temperatura mínima [°C]	0,22	0,08	1,40	0,31	42,6
10	Humedad mínima [%]	-0,09	8,00	1,43	0,28	36,4
11	Presión atmosférica [hPa]	-0,18	185,41	1,44	0,27	34,6
12	Temperatura del punto de rocío [°C]	0,15	1,68	1,56	0,14	15,6
13	Velocidad media del viento [m.s ⁻¹]	2,81	2,62	1,60	0,10	10,1
14	Humedad máxima [%]	-0,12	14,53	1,61	0,09	8,9



RESULTADOS: Tasas de EVT y de E en función de variables meteorológicas

Regresión lineal simple
CSV (n = 105)

Orden	Variable Meteorológica	a	b	RMSE	R ²	F ⁽¹⁾
1	Radiación solar [W.m ⁻²]	0,01	-0,81	1,08	0,45	83,1
2	Presion atmosférica [hPa]	-0,18	178,80	1,13	0,39	66,4
3	Radiación extraterrestre [W.m ⁻²]	0,01	-1,72	1,13	0,39	64,7
4	Horas diurnas [%]	26,25	-5,08	1,18	0,34	53,2
5	Temperatura media [°C]	0,19	-1,04	1,18	0,33	51,5
6	Temperatura media diurna [°C]	0,19	-1,55	1,20	0,31	47,1
7	Déficit de presión de vapor [kPa]	1,84	0,47	1,20	0,31	46,9
8	Temperatura máxima [°C]	0,16	-1,56	1,22	0,30	43,2
9	Temperatura mínima [°C]	0,17	0,32	1,22	0,29	42,5
10	Temperatura del punto de rocío [°C]	0,13	1,26	1,33	0,16	19,7
11	Velocidad media del viento [m.s ⁻¹]	2,98	1,86	1,33	0,16	19,5
12	Humedad relativa media [%]	-0,09	9,80	1,34	0,15	17,7
13	Humedad mínima [%]	-0,06	5,67	1,36	0,12	13,7
14	Humedad máxima [%]	-0,04	6,33	1,44	0,01	1,0



RESULTADOS: Tasas de EVT y de E en función de variables meteorológicas

Regresión lineal múltiple
2, 3 y 4 variables simultáneas

RS: radiación solar
TMi: temperatura mínima del aire
TO: temperatura del punto de rocío
TMa: temperatura máxima del aire
TMd: temperatura media diurna del aire
URm: humedad relativa media
Pm: presión atmosférica
Vm: velocidad media del viento

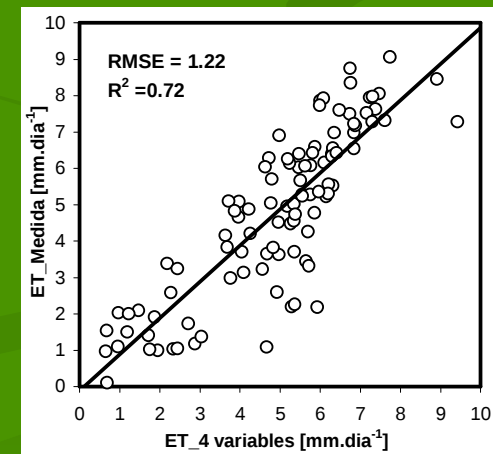
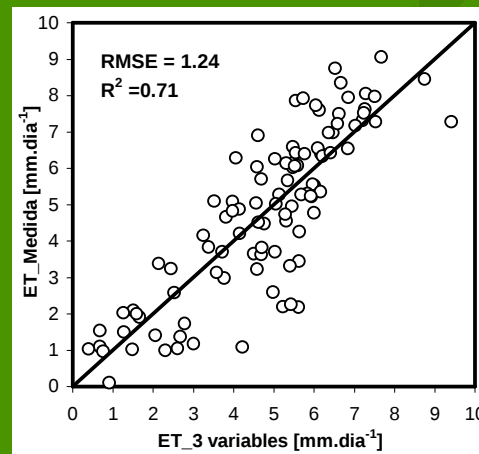
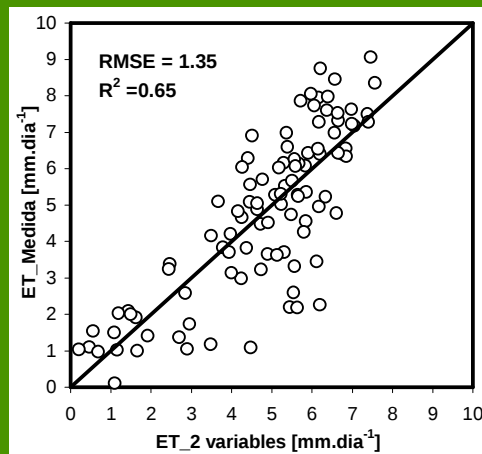
RLM entre EVT_CCV y variables meteorológicas			
Nro. Variables	Ecuación de regresión	RMSE	R ²
2 v	0,021 RS + 0,186 TMi - 3,867	1,35	0,65
3 v	0,018 RS + 0,523 TMi - 0,365 TO - 3,501	1,24	0,71
4 v	0,020 RS + 0,580 TMi - 0,342 TO - 0,104 TMa - 2,161	1,22	0,72



RLM entre E_TCA y variables meteorológicas			
Nro. Variables	Ecuación de regresión	RMSE	R ²
2 v	0,014 RS + 0,194 TMd - 4,931	0,85	0,74
3 v	0,011 RS + 0,200 TMd - 0,057 URm - 0,066	0,79	0,78
4 v	0,011 RS + 0,149 TMd - 0,065 URm + 0,050 TMi + 0,916	0,79	0,78



RLM entre E_CSV y variables meteorológicas			
Nro. Variables	Ecuación de regresión	RMSE	R ²
2 v	0,010 RS - 0,109 Pm + 110,143	0,96	0,56
3 v	0,008 RS - 0,112 Pm + 1,283 Vm + 112,297	0,94	0,59
4 v	0,007 RS - 0,116 Pm + 1,446 Vm - 0,020 URm + 117,566	0,93	0,60

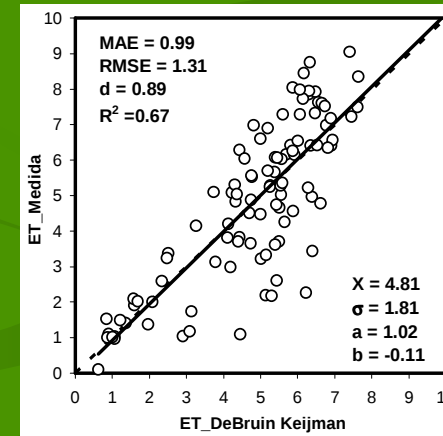
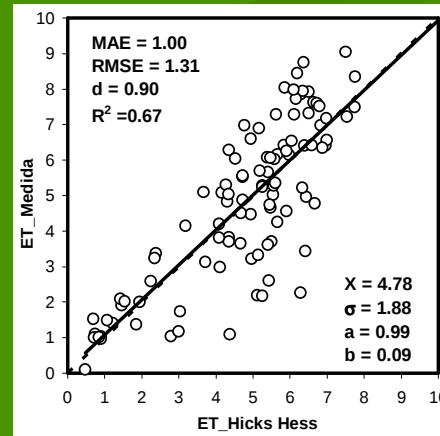
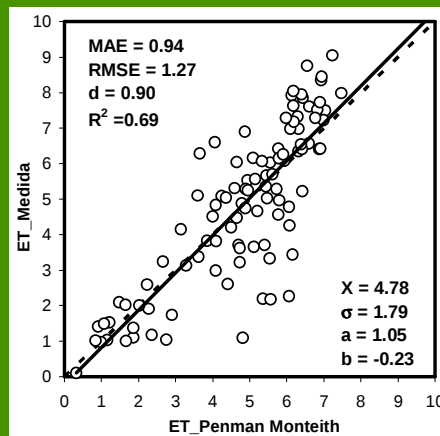
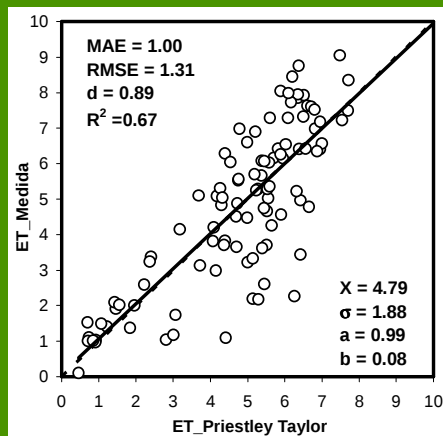


RESULTADOS: Tasas de EVT y de E empleando fórmulas de uso comun

Tanque con vegetación
(n = 100)



Fórmula	Orden	$\bar{X}$	σ_X	a	b	MAE	d	RMSE	RMSEs	RMSEns	R ²
Priestley Taylor	1	4.79	1.88	0.99	0.08	1.00	0.89	1.31	0.03	1.31	0.67
Penman Monteith	2	4.78	1.79	1.05	-0.23	0.94	0.90	1.27	0.10	1.26	0.69
Hicks Hess	3	4.78	1.88	0.99	0.09	1.00	0.90	1.31	0.04	1.31	0.67
DeBruin Keijman	4	4.81	1.81	1.02	-0.11	0.99	0.89	1.31	0.04	1.31	0.67
Tanner Pelton	5	4.80	1.78	1.03	-0.13	1.03	0.88	1.35	0.05	1.35	0.65
Penman 1966	6	4.70	1.86	0.99	0.14	0.99	0.89	1.32	0.11	1.31	0.67
Radiação neta	7	4.81	1.73	1.04	-0.22	1.05	0.88	1.38	0.08	1.37	0.64
Makkink	8	4.77	1.78	0.99	0.07	1.07	0.87	1.42	0.04	1.42	0.61

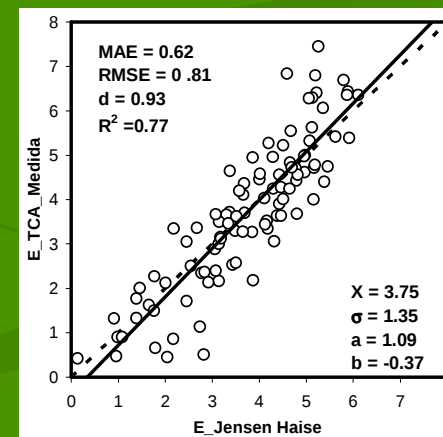
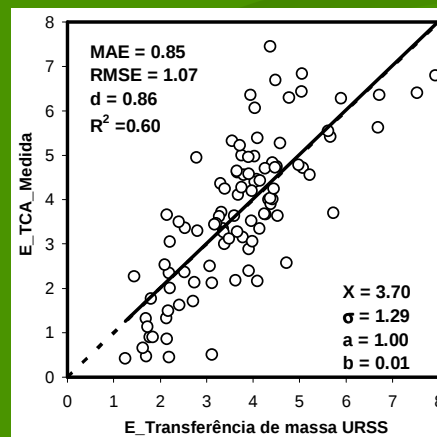
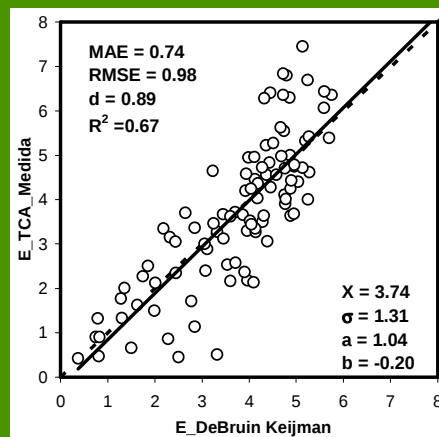
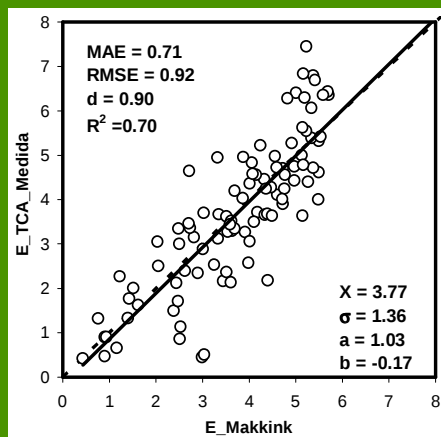


RESULTADOS: Tasas de EVT y de E empleando fórmulas de uso común

Tanque clase A
(n = 97)



Fórmula	Orden	$\bar{X}$	σ_X	a	b	MAE	d	RMSE	RMSEs	RMSEns	R ²
Makkink	1	3.77	1.36	1.03	-0.17	0.71	0.90	0.92	0.07	0.92	0.70
DeBruin Keijman	2	3.74	1.31	1.04	-0.20	0.74	0.89	0.98	0.07	0.97	0.67
Transferência de massa URSS	3	3.70	1.29	1.00	0.01	0.85	0.86	1.07	0.02	1.07	0.60
Jensen Haise	4	3.75	1.35	1.09	-0.37	0.62	0.93	0.81	0.13	0.80	0.77
Hicks Hess	5	3.77	1.29	1.04	-0.20	0.77	0.87	1.01	0.07	1.01	0.64
Stephens Stewart	6	3.77	1.36	1.08	-0.38	0.62	0.93	0.81	0.13	0.80	0.77
Blaney Criddle RAD	7	3.73	1.32	1.11	-0.43	0.62	0.92	0.81	0.15	0.80	0.77
Tanner Pelton	8	3.78	1.28	1.02	-0.15	0.79	0.86	1.05	0.07	1.05	0.61

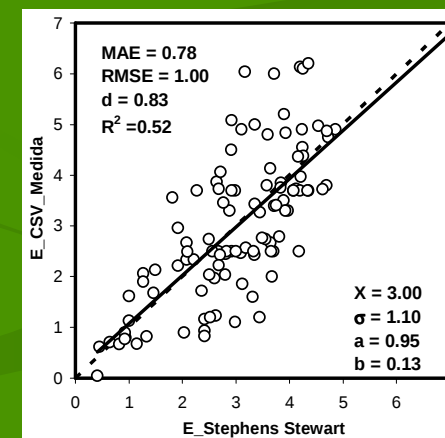
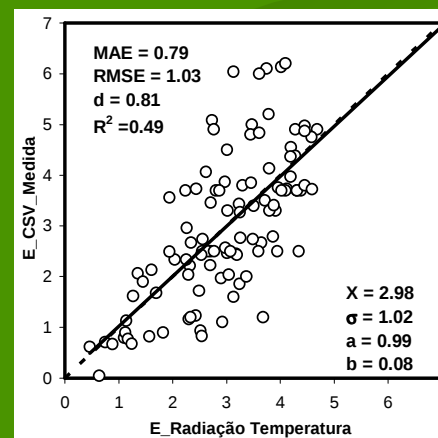
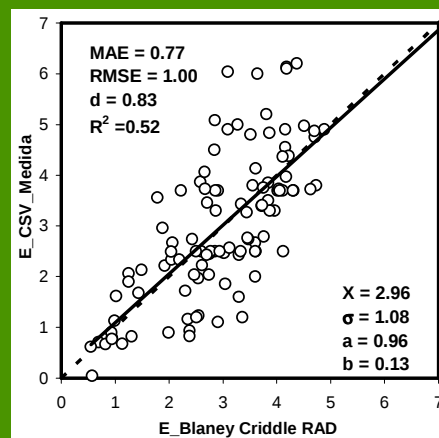
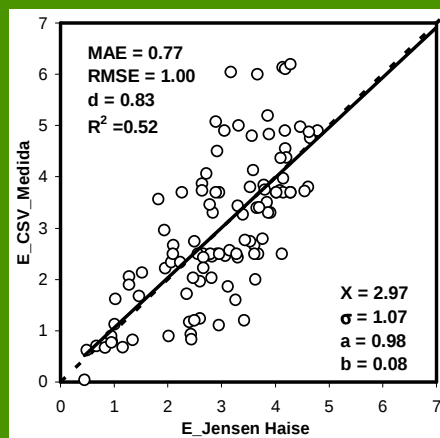


RESULTADOS: Tasas de EVT y de E empleando fórmulas de uso común

Tanque sin vegetación
(n = 105)



Fórmula	Orden	$\bar{X}$	σ_X	a	b	MAE	d	RMSE	RMSEs	RMSEns	R ²
Jensen Haise	1	2.97	1.07	0.98	0.08	0.77	0.83	1.00	0.03	1.00	0.52
Blaney Criddle RAD	2	2.96	1.08	0.96	0.13	0.77	0.83	1.00	0.04	1.00	0.52
Radiação Temperatura	3	2.98	1.02	0.99	0.04	0.79	0.81	1.03	0.01	1.03	0.49
Stephens Stewart	4	3.00	1.10	0.95	0.13	0.78	0.83	1.00	0.06	1.00	0.52
Makkink	5	3.05	1.07	0.96	0.05	0.79	0.82	1.02	0.09	1.02	0.51
DeBruin Keijman	6	3.00	0.99	1.02	-0.09	0.80	0.80	1.04	0.03	1.04	0.49
Radiação neta	7	2.96	1.00	0.98	0.08	0.82	0.79	1.06	0.03	1.06	0.46
Tanner Pelton	8	2.94	1.01	0.97	0.12	0.82	0.79	1.06	0.05	1.06	0.46



APLICACIÓN AL BAÑADO DEL TAIM:

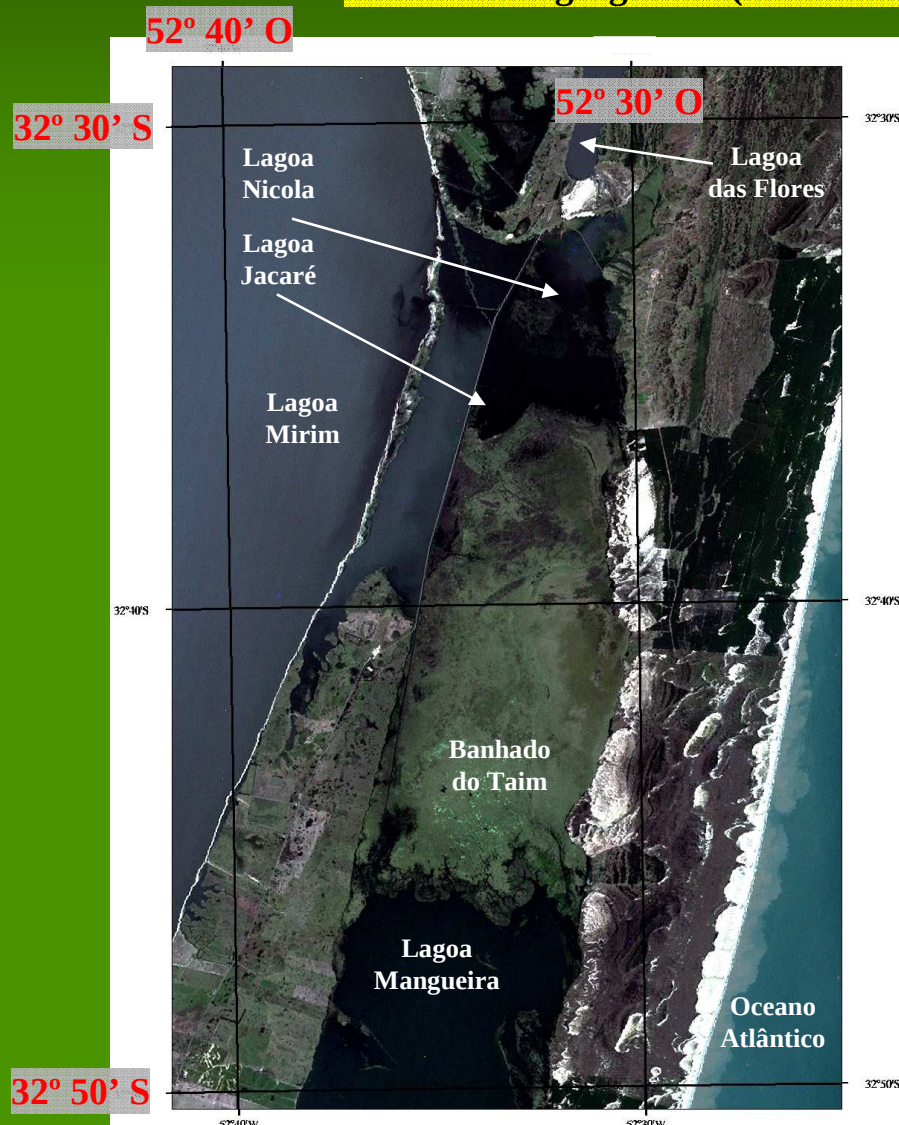
Simulación de nivel de largo plazo



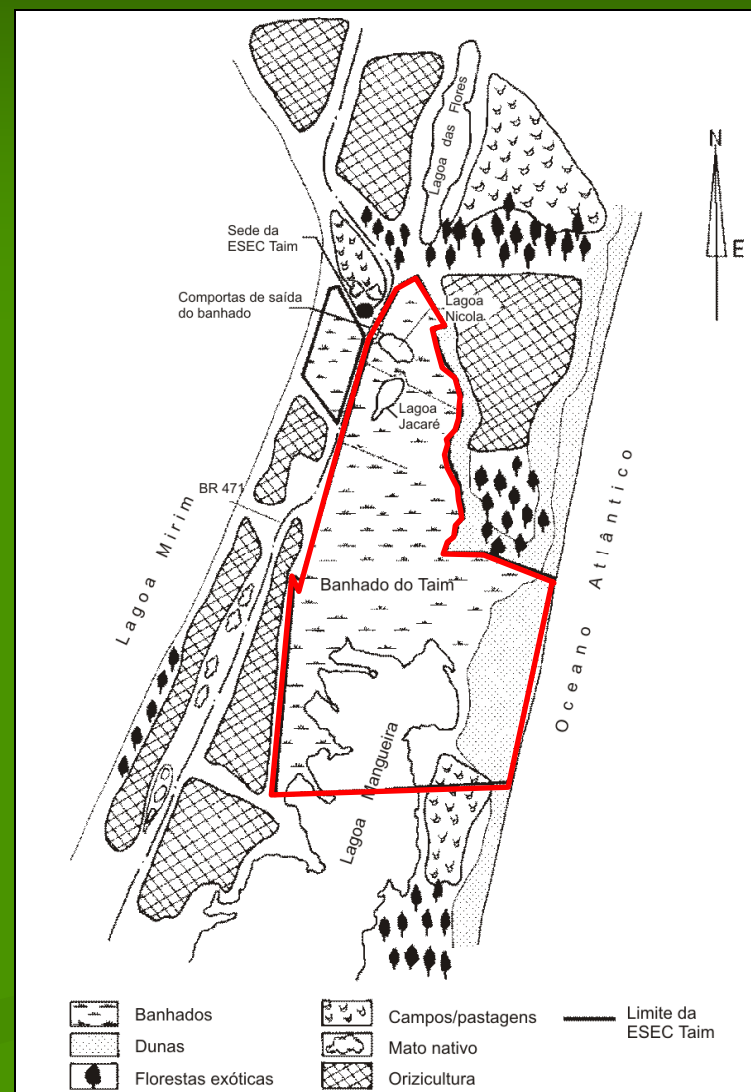
(Autor: Cristiano Dalla-Rosa)

APLICACIÓN: Descripción del bañado del Taim

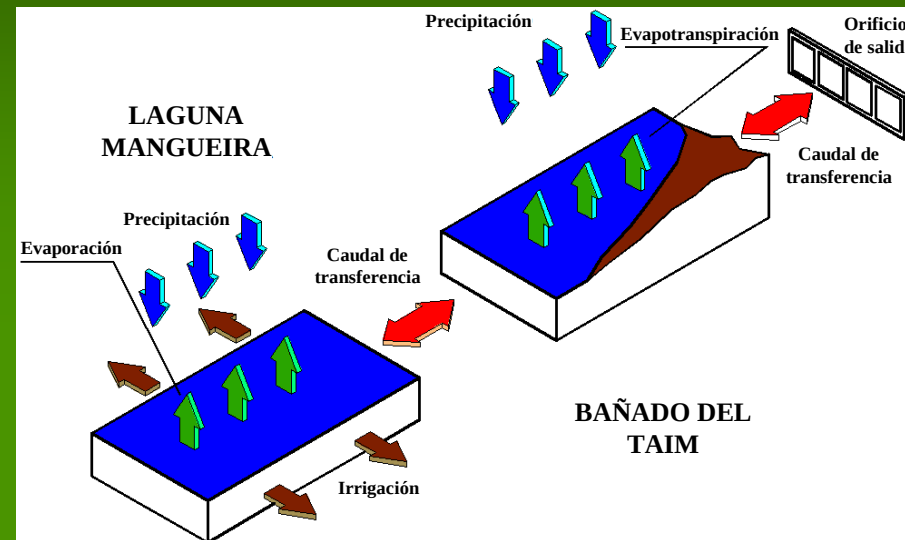
Localización geográfica (18/08/2000)



Usos del suelo (Fuente: Villanueva, 1997)



APLICACIÓN: descripción del modelo para simulación de niveles



MÓDULO LAGUNA MANGUEIRA:

$$\Delta V_{MANG} = (P - E) \cdot A_{SMANG} + P \cdot C_e \cdot A_{bacia} - I \pm Qt_{MAT}$$

ΔV_{MANG} : variación de volumen en el tiempo [m³],

P : precipitación sobre la cuenca [m],

E : tasa de evaporación de la laguna [m],

A_{SMANG} : área superficial de la laguna [m²],

C_e : coef. escurrimiento de la cuenca de aporte,

A_{bacia} : área de la cuenca de aporte [m²],

I : volumen de agua extraído para irrigación [m³],

Qt_{MAT} : caudal entre laguna y bañoado en el tiempo [m³]

MÓDULO BAÑADO TAIM:

$$\Delta V_{TAIM} = (P - ET) \cdot A_{STAIM} \pm Qt_{MAT} \pm Qt_{TMI}$$

ΔV_{TAIM} : variación de volumen en el tiempo [m³],

ET : tasa de evapotranspiración del bañoado [m],

A_{STAIM} : área superficial del bañoado [m²],

Qt_{TMI} : caudal entre bañoado y laguna Mirim en el tiempo [m³]

APLICACIÓN: Datos utilizados

Datos mensuales , serie enero 1960 a julio 2006

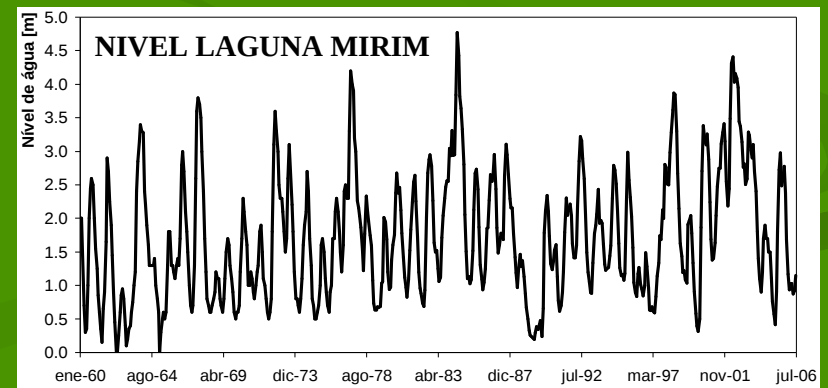
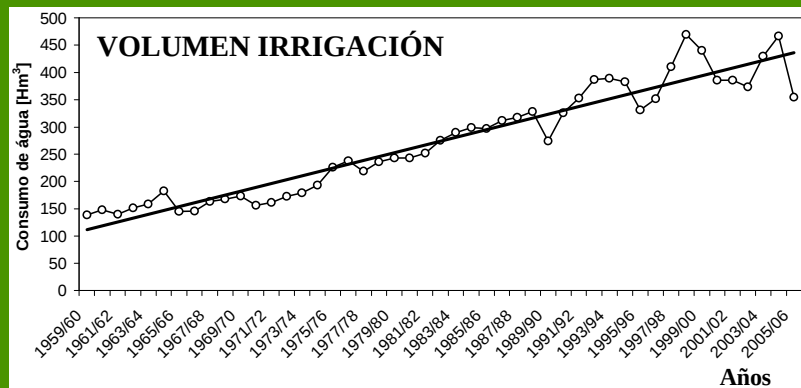
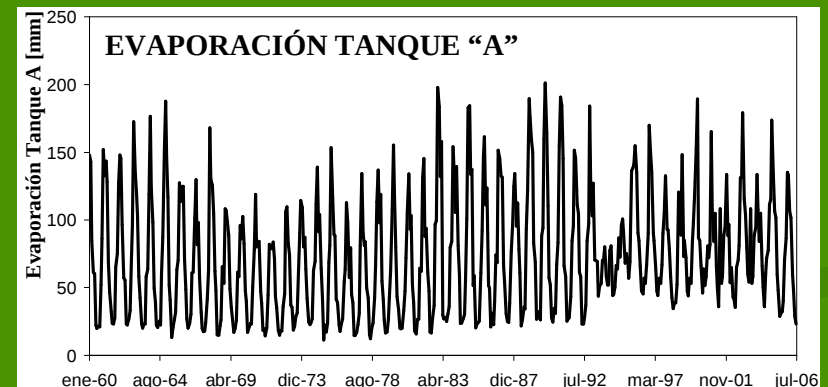
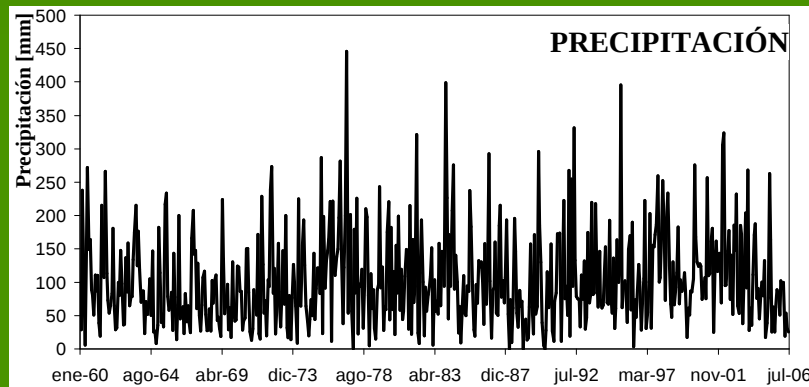
Serie original: 1960 a 2001 (Villanueva)

Extensión desde enero 2002 hasta julio 2006

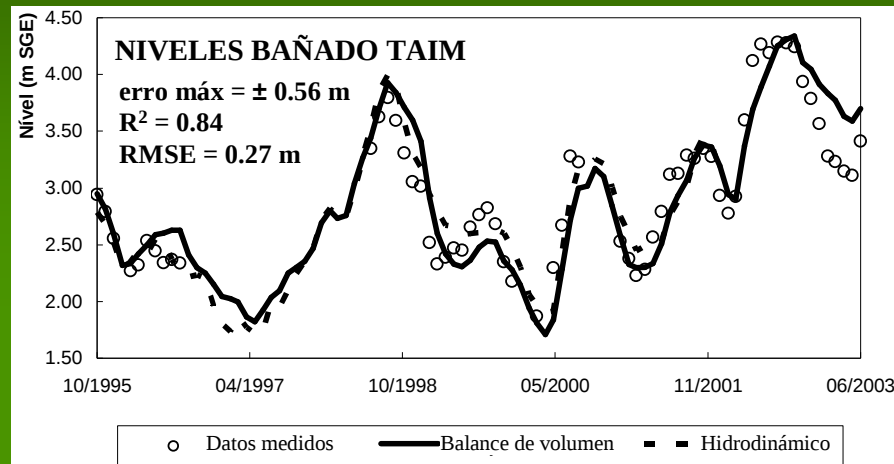
❑ Sistema de Informaciones Hidrológicas de la ANA (9 est.)

❑ Instituto Riograndense del Arroz IRGA

❑ Agencia de la Laguna Mirim



APLICACIÓN: Calibración del modelo y coeficientes utilizados



Período calibración: octubre 1995 a junio 2003
63 valores medios mensuales

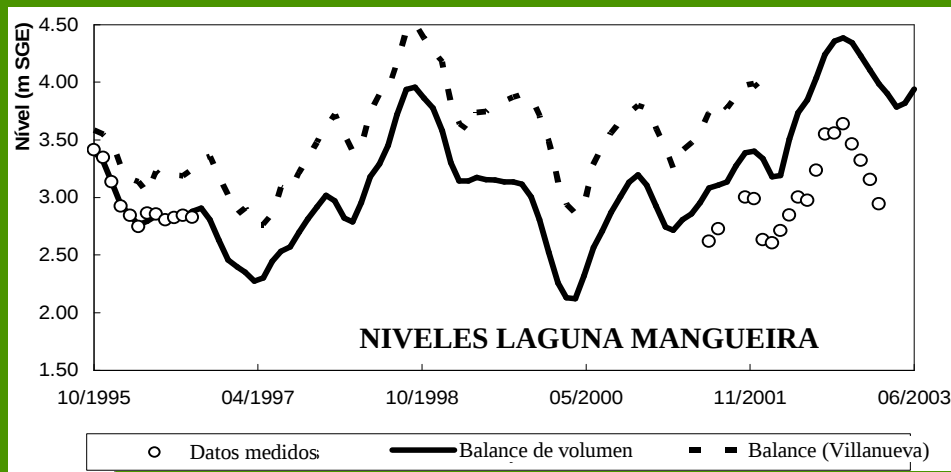
Paso de cálculo: 1 día

Coeficiente escurrimiento de la cuenca de aporte:
✓ 0.25 hasta 0.52 (IPH, 1997 y Villanueva, 1997)
✓ POR CALIBRACIÓN 0.25

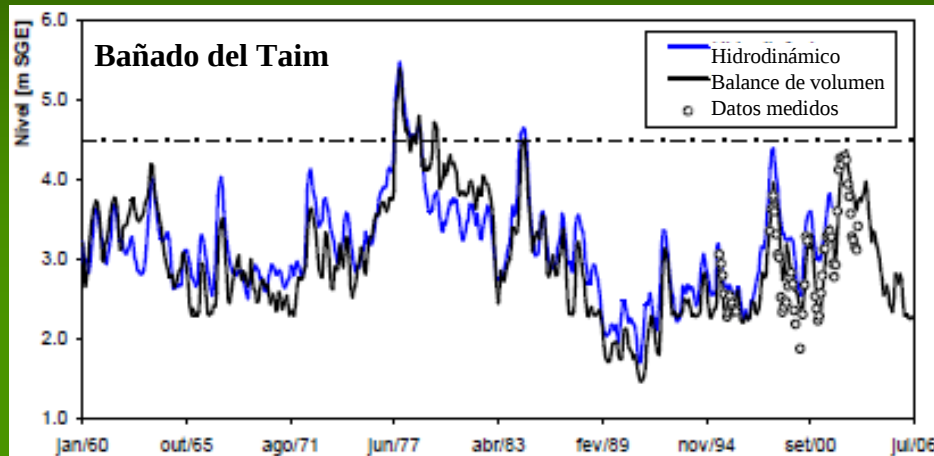
Coeficiente de Tanque laguna Mangueira (K_E):
✓ $0.6 < K_E < 0.8$ (lagunas playas)
✓ POR CALIBRACIÓN 0.8

Coeficiente de ET para el bañado (K_{ET}):
✓ $0.6 < K_{ET} < 12.5$
✓ POR EXPERIMENTO 1.36

Coeficiente de gasto de los orificios (C_d):
✓ $0 < C_d < 1$
✓ POR CALIBRACIÓN 0.35



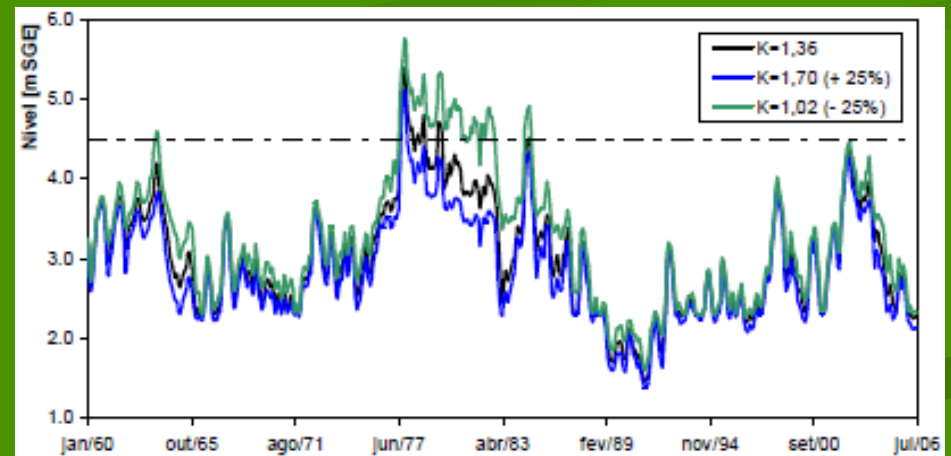
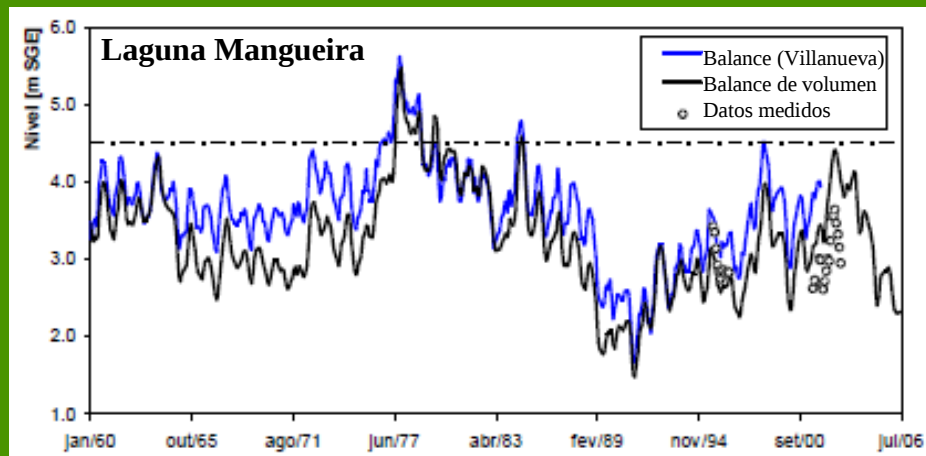
APLICACIÓN: Resultados obtenidos



Período simulado: enero 1960 hasta julio 2006

- ✓ Nivel medio (hidrodinámico) = 3.15 m
- ✓ Nivel medio (balance volumen) = 2.97 m
- ✓ El modelo de balance consigue representar la tendencia del modelo hidrodinámico.

Sensibilidad del coeficiente K_{ET}



CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES:

- ❑ El cálculo de la tasa de EVT para la macrófita “Zizaniopsis bonariensis” involucra una gran cantidad de variables, tanto físicas como biológicas. El uso de tanques de cultivo es una herramienta práctica, de fácil mantenimiento y de bajo costo que permite medir el consumo diario de agua de la vegetación.
- ❑ Se obtuvo una tasa de EVT de 5.2 mm.dia⁻¹, una tasa de evaporación para el tanque sin vegetación de 3.1 mm.dia⁻¹ y para el TCA de 3.8 mm.dia⁻¹; considerando el período completo del experimento. El mayor consumo de agua se produjo para la estación de verano, donde la vegetación se encuentra más desarrollada, EVT de 6.2 mm.dia⁻¹.
- ❑ El empleo de un tanque clase A permitió calcular la relación de consumos $EVT / E = 1.4$ para el período entero, fluctuando entre 0.95 para invierno y 1.52 para primavera; indicando que en las condiciones meteorológicas del sitio, esta macrófita consume más agua que una superficie libre.
- ❑ Debido a la escasez de datos locales respecto a valores de EVT, los resultados aquí obtenidos pueden ser útiles para ser aplicados a otras regiones con características meteorológicas semejantes.
- ❑ El uso del tanque clase A permite extrapolar la tasa de EVT medida para esta macrófita particular a partir de un valor registrado de evaporación. Sin embargo debe ser considerada la representatividad de las características meteorológicas del lugar de experimentación cuando se pretenda estimar valores de EVT en otro sitio.

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES:

- ❑ Respecto del tratamiento efectuado a los datos de evaporación / evapotranspiración medidos, se destaca la importancia de la depuración de la serie original; eliminación de días con precipitación, falla eléctrica, limpieza de los tanques, condiciones de advección y outliers.
- ❑ La aplicación del modelo de RLS indica que la radiación solar es la variable mejor correlacionada con las tasas de evaporación / evapotranspiración medidas, coincidiendo este hecho con la literatura. En el caso de la EVT, la radiación solar extraterrestre es la segunda variable en importancia, siendo de fácil estimativa y por lo tanto de uso práctico y económico. Las variables meteorológicas que presentaron menor correlación con la tasa de EVT son el viento y la presión atmosférica, con la tasa de E (TCA) el viento, la humedad y la presión atmosférica; y con la tasa de E (CSV) la humedad y el viento.
- ❑ La aplicación de los modelos de RLM indica que las variables que mayor incidencia tienen en la tasa de EVT luego de la radiación solar, son la temperatura mínima, la temperatura del punto de rocío y la temperatura máxima. La RLM mejora significativamente la correlación entre EVT y variables meteorológicas, sin embargo el empleo de una cuarta variable no mejora sustancialmente la regresión.
- ❑ Las denominadas fórmulas de uso comun deben ser empleadas cuidadosamente, siendo sumamente importante conocer las condiciones climáticas donde fueron desarrolladas, las aplicaciones para las que fueron ideadas y las simplificaciones efectuadas en su cálculo.

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES:

- ❑ La evidencia indica que, según el método de clasificación empleado, la ecuación que representa mejor los valores medidos de la tasa de EVT es la fórmula de Priestley-Taylor, seguida por las expresiones de Penman-Monteith y de Hicks-Hess. De las ocho mejores ecuaciones, seis se basan en la radiación y dos en el enfoque de combinación.
- ❑ La ecuación de Priestley-Taylor es de uso práctico, ya que solamente precisa del valor de la radiación solar neta para su cálculo. Ecuaciones de mayor complejidad, como Penman-Monteith, a pesar de tener un fundamento teórico más robusto, precisan de un elevado número de parámetros para su cálculo.
- ❑ Considerando el fenómeno de evaporación, las ecuaciones que presentaron mejores resultados fueron las basadas en la radiación. Esto refuerza nuevamente, la idea de que la radiación es la principal variable o fuerza asociada con este proceso. Entre estas pueden ser enunciadas Makkink , Jensen-Haise y Stephens-Stewart.
- ❑ La modelación simplificada del bañado provee una herramienta simple para simular respuestas de largo plazo necesarias para evaluar como se comportará el bañado frente a cambios en alguna de las variables de entrada o salida al mismo. Los resultados demuestran que el modelo desarrollado consigue representar las tendencias de nivel de largo plazo en el bañado.
- ❑ En relación a la incidencia del coeficiente de EVT utilizado, los resultados indican que variaciones de $\pm 25\%$ en el mismo, producen un cambio de relativa importancia en cuanto a los niveles en el bañado.

LINEAS DE INVESTIGACIÓN SUGERIDAS:

- 1) Iniciar un programa de mediciones en el bañado del Taim empleando diferentes especies vegetales. Se propone la instalación de un esquema de varios recipientes, como los utilizados en este trabajo, en forma duplicada; es decir un grupo situado en las márgenes del bañado y otro grupo semejante en una tarima flotante dentro del bañado para evaluar las diferencias en las tasas de EVT medidas entre margen e interior del bañado.
- 2) Evaluar el grado de correlación existente entre los valores medidos de EVT y las diferentes variables meteorológicas observadas, para diferentes períodos de medición, menores y mayores que un día. También es posible evaluar el uso de las fórmulas estudiadas aplicadas a dichos períodos de tiempo.
- 3) Para mejorar los datos de topografía del bañado se recomienda realizar tareas de relevamiento topográfico y batimétrico del fondo del mismo. Además, resulta necesario disponer de mayores períodos con datos de niveles para calibración del modelo, tarea que precisa de un registro continuo de los niveles en la laguna Mangueira y dentro del bañado. Conjuntamente se aconseja medir en forma sistemática el caudal de la estructura de salida del bañado.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN!!!

Carlos Marcelo Scuderi
Ingeniero Civil – Master en Recursos Hídricos

Docente Recursos Hídricos III – Departamento de Hidráulica
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis. Rosario (2000). Santa Fe. Argentina. Telefax: +54 (341) 4808541
e-mail: cscuderi@fceia.unr.edu.ar

