

# ESTUDIO “VARIABILIDAD DE FACTORES AMBIENTALES EN EL HUMEDAL DEL RIO CRUCES Y TOLERANCIA DEL LUCHECILLO (*EGERIA DENSA*) A TEMPERATURAS EXTREMAS”

SEPTIEMBRE 2008



Universidad Austral de Chile  
Conocimiento y Naturaleza



*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

## INDICE

	Página
1. RESUMEN EJECUTIVO	1
2. EL HUMEDAL DEL RIO CRUCES, SANTUARIO DE LA NATURALEZA E INVESTIGACION CIENTIFICA CARLOS ANWANDTER	7
2.1. Los cambios ambientales ocurrentes en el humedal del río Cruces durante el año 2004	7
2.2. Las conclusiones de los estudios de la Universidad Austral de Chile	9
3. EL ESTUDIO “ELABORACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL DEL ECOSISTEMA DEL HUMEDAL DEL RÍO CRUCES” (Facultad de Ciencias, Universidad de Chile)	18
3.1. Antecedentes	18
3.2. Objetivos	18
3.3. La hipótesis de Marín <i>et al.</i> (2008 a, b)	19
3.4. Observaciones al estudio de Marín <i>et al.</i> (2008 a, b)	24
4. EL PRESENTE ESTUDIO	39
4.1. Fundamentación y objetivos	39
4.2. Marco teórico	41
4.2.1. Temperatura del aire, precipitaciones y caudales hídricos	41
4.2.2. Hidrodinámica	43

4.2.3.	Fotosíntesis y cambios en condiciones de vida de las plantas	45
5.	MATERIAL Y METODOS	46
5.1.	En relación a objetivo específico i: análisis de la temperatura del aire durante el invierno del año 2008 en el humedal del río Cruces y río Calle Calle	46
5.2.	En relación a objetivo específico ii: análisis de registros históricos diarios de temperatura mínima del aire y precipitaciones en Valdivia y caudal del río Cruces en Rucaco	49
5.3.	En relación a objetivo específico iii: análisis de la variabilidad de la temperatura del aire y del agua en el humedal del río Cruces y río Calle Calle	51
5.4.	En relación a objetivo específico iv: análisis de caudales y variabilidad mareal en el humedal del río Cruces	52
5.5.	En relación a objetivo específico v: tolerancia del Luchecillo a temperaturas extremas del agua	53
6.	RESULTADOS	55
6.1.	Temperatura del aire durante el invierno del año 2008 en el humedal del río Cruces y río Calle Calle	55
6.2.	Variabilidad histórica de la temperatura mínima del aire y precipitaciones en Valdivia y caudal del río Cruces en Rucaco	57
6.3.	Variabilidad de la temperatura del aire y del agua en diferentes sitios del humedal del río Cruces y río Calle Calle	74
6.4.	Hidrodinámica	77
6.5.	Tolerancia del Luchecillo a temperaturas extremas del agua	79

<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y DISCUSION GENERAL</b>	<b>86</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>89</b>
<b>9.</b>	<b>INVESTIGADORES PARTICIPANTES</b>	<b>94</b>

## 1. RESUMEN EJECUTIVO

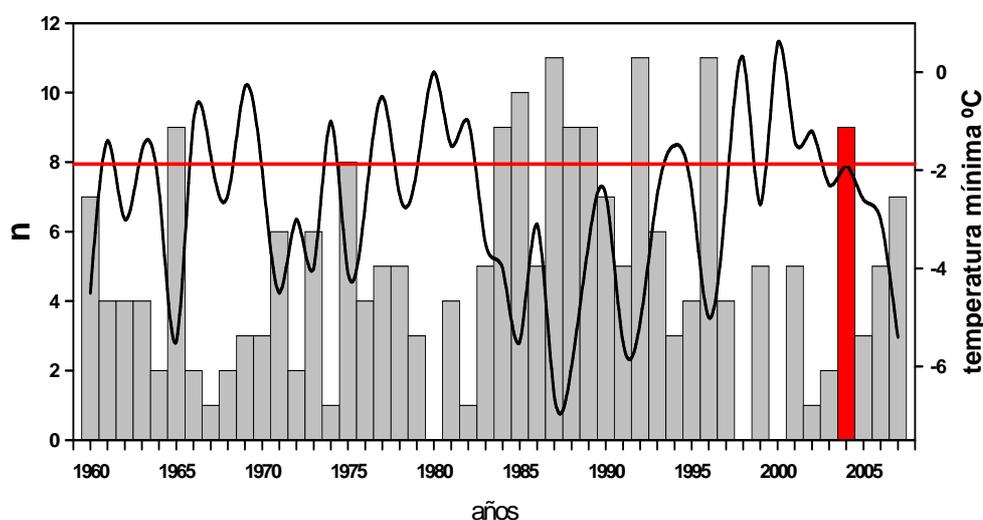
Durante el invierno del año 2004, se observó una alta emigración y mortalidad del Cisne de cuello negro (*Cygnus melancorhyphus*), en el humedal del río Cruces (Valdivia), el principal sitio reproductivo de esta especie en el área neotropical de Sudamérica. También se observó una reducción significativa en la distribución espacial y cobertura de la macrófita *Egeria densa* (Luchecillo), fuente primaria de alimento para los Cisnes de cuello negro y otras aves herbívoras del humedal. Para evaluar las causas de estos cambios ambientales, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), contrató a la Universidad Austral de Chile para llevar a cabo el “Estudio sobre origen de mortalidades y disminución poblacional de aves acuáticas en el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter, en la Provincia de Valdivia”, cuyas principales conclusiones fueron: i) los Cisnes de cuello negro murieron de emaciación o enflaquecimiento extremo (debido a la desaparición de su alimento, el Luchecillo), acompañada de intoxicación por hierro (hemocromatosis) y una alta carga parasitaria; ii) la abundancia poblacional de otras aves herbívoras como Taguas y Taguitas, también resultó afectada por la desaparición del Luchecillo; iii) el Luchecillo fue afectado negativamente por la alta carga de metales pesados (primariamente hierro), que se depositó sobre sus hojas; iv) la causa más probable de la precipitación de esos metales, estuvo relacionada a las altas cargas de químicos provenientes de la planta Valdivia de Celulosa Arauco y Constitución S.A. ubicada aproximadamente 20 Km aguas arriba del humedal; v) la calidad de agua del río Cruces cambió significativamente, después que esa planta empezó a producir en Febrero del año 2004, y vi) fenómenos naturales de macroescala y que operan más allá de la cuenca (e.g. radiación ultravioleta, cambios interanuales en precipitaciones y caudales hídricos), no estuvieron involucrados en los cambios ambientales que se originaron durante el año 2004 en el humedal del río Cruces y cauces tributarios.

Recientemente, investigadores de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile (Marín *et al.* 2008 a), han propuesto que **“durante el mes de mayo de 2004 se produjeron en la zona del humedal de río Cruces las tres condiciones que, para**

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

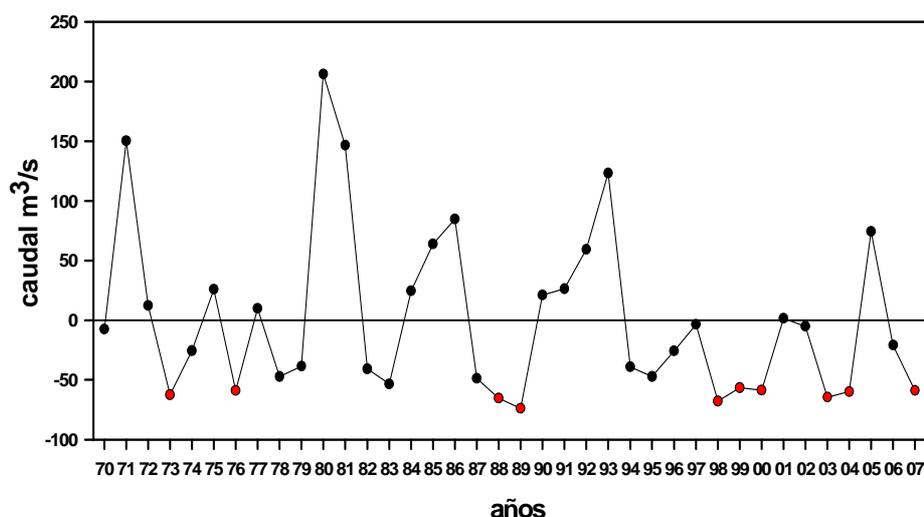
**otros ecosistemas, han demostrado erradicar a *Egeria densa*: (1) bajos caudales que producen exposición de los sedimentos en zonas bajas (bañados), (2) ausencia de lluvias y, (3) tres eventos fríos”** (copia textual). En resumen, Marín *et al.* (2008 a, b) postulan que los cambios observados en el humedal del río Cruces durante el año 2004, pueden ser explicados por variabilidad ambiental natural. Por lo tanto, el objetivo general de este estudio es revisar los fundamentos y evidencia empírica sobre la cual se sustenta la hipótesis presentada por los investigadores de la Universidad de Chile. Para cumplir con este objetivo se realizaron los siguientes estudios: i) análisis de los datos de temperatura mínima del aire, precipitaciones y caudal hídrico, registrados en el área de Valdivia durante las últimas cuatro décadas, ii) evaluación de la representatividad espacial de sedimentos expuestos durante marea baja y en condiciones de bajo caudal, iii) efecto de las mareas y caudal sobre la altura del espejo de agua en el humedal del río Cruces, iv) variabilidad espacial y temporal de la temperatura mínima del aire y del agua en el humedal, y v) evaluación del efecto de temperaturas bajas sobre la funcionalidad fotosintética de *Egeria densa*.

El análisis de la información meteorológica disponible en el Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile, evidencia que la frecuencia e intensidad de las heladas ( $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ocurridas durante Mayo del año 2004, fue menor a las que se han registrado en el mismo mes durante muchos de los años anteriores (ver Fig. siguiente).



Frecuencia (n) e intensidad de heladas durante el mes de Mayo, período 1960-2007. Mayo del año 2004 se destaca en rojo. La línea horizontal del mismo color indica la temperatura más baja medida durante ese mes ( $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a la vez que la línea negra muestra los valores de las temperaturas más bajas durante Mayo de otros años.

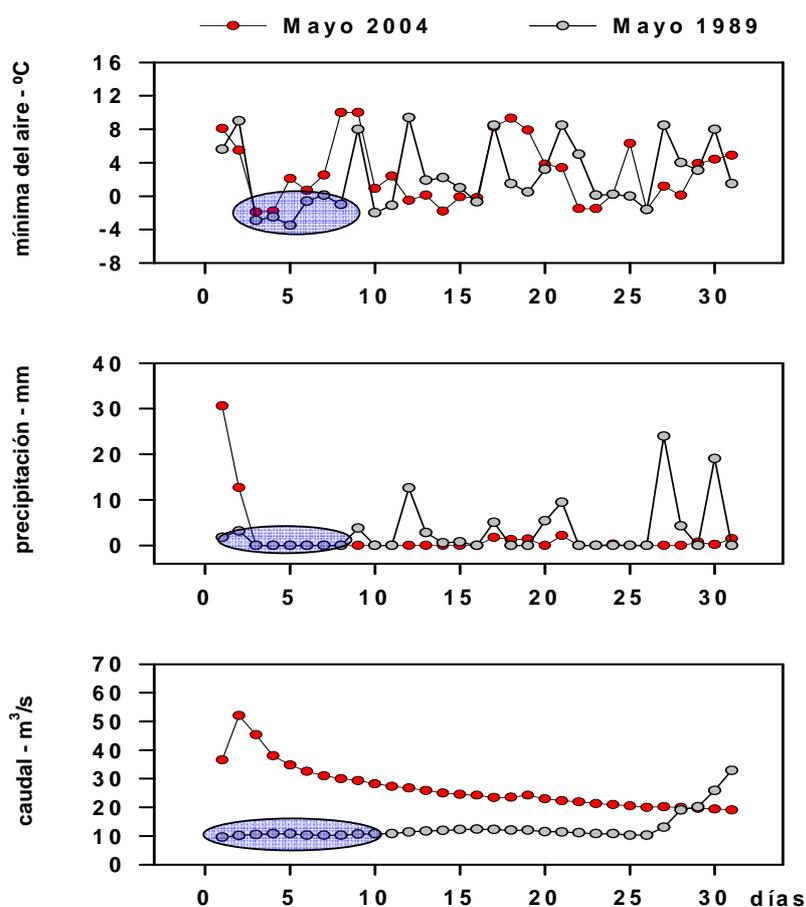
Marín *et al.* (2008 a, b) sostienen que Mayo del año 2004, fue un mes en el cual el caudal del río Cruces fue particularmente bajo. Sin embargo, caudales similares y aún más bajos que los registrados durante Mayo del año 2004 han sido registrados en varias ocasiones en las últimas tres décadas (ver Fig. siguiente). En resumen, temperaturas bajas del aire y caudales bajos, han sido registrados con anterioridad a Mayo del año 2004.



Anomalías del caudal del río Cruces en Rucaco, durante el mes de Mayo. Los datos se grafican en relación al promedio histórico para ese mes ( $86.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ), indicado por la línea horizontal negra. Los círculos rojos son años en que los valores de caudal del río durante Mayo de otros años, fueron similares al de Mayo del año 2004.

El mes de Mayo del año 2004, propuesto por Marín *et al.* 2008 (a, b), como el periodo en el que habría ocurrido el evento inicial que gatilló la mortalidad masiva de *Egeria densa* en el humedal del río Cruces y cauces tributarios, se caracterizó por presentar 9 días con temperaturas bajo cero  $^{\circ}\text{C}$ , 28 días con precipitaciones entre 0 y 2 mm y una dominancia de eventos de caudal con  $20 - 25 \text{ m}^3/\text{s}$  (cuatro días con caudales menores). Nuestro estudio demuestra que los eventos extremos propuestos por Marín *et al.* (2008 a, b) ocurrieron en forma simultánea sólo el 22 de Mayo del año 2004. Esta situación emerge de la definición de un caudal “bajo”. Marín *et al.* (2008 a) (pág. 61) sostienen que el caudal de Mayo del año 2004 es “bajo” en relación al promedio histórico observado entre los años 1969 y 2004. Sin embargo, este caudal “bajo” ya había sido registrado en Mayo de años anteriores. El uso en nuestros análisis de un valor de  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  como un valor de caudal “bajo”, resultó en la determinación de la co-ocurrencia de siete eventos extremos durante Mayo del año 2004, número más alto que

los tres eventos propuestos por Marín *et al.* (2008 a, b). Sin embargo, bajo estas condiciones de mayor caudal, la co-ocurrencia de eventos también se había registrado a frecuencias similares y aún mayores, en al menos seis periodos de otoño-invierno de años previos al 2004. Condiciones mas extremas de caudal “bajo” ( $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ) también habían sido registradas durante Abril o Mayo de los años 1976, 1984, 1989 y 1999, incluso hasta durante 10 días de cada mes. Estos resultados muestran que las condiciones propuestas por Marín *et al.* 2008 (a, b) y que ocurrieron con anterioridad al año 2004, no resultaron en mortalidades masivas de *Egeria densa* en el humedal. Más aún, los tres eventos fríos propuestos por Marín *et al.* 2008 (a, b) no son consecutivos. Sin embargo, nuestros resultados indican que la co-ocurrencia de eventos extremos puede ser incluso consecutiva, habiéndose ya registrado esta situación al menos durante Abril-Mayo de seis años previos al año 2004. La Figura siguiente es un ejemplo de tal situación.



Variabilidad diaria de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el suelo, precipitaciones y caudal del río Cruces: Mayo 2004 versus Mayo 1989. Las elipses en azul señalan los días cuando coinciden temperaturas bajo cero °C, nula precipitación y caudales inferiores a  $20\text{-}30 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Los resultados anteriores ya indican que la hipótesis de Marin *et al.* 2008 (a, b) carece de sustento empírico, debido a que las condiciones propuestas como extremas ya habían sido observadas previamente y no causaron mortalidades masivas de *Egeria densa*. Es importante resaltar también, que los registros de temperatura del agua en los ríos Cruces, Pichoy y Calle Calle realizados durante el presente invierno, muestran escasa variabilidad temporal, mientras que la temperatura del aire en sus riberas presenta diferencias de hasta 5-6 °C. Esto indica que la temperatura del agua en el humedal del río Cruces y cauces tributarios, no es afectada mayormente por la variabilidad en la temperatura del aire. Por lo tanto, los eventos extremos en temperatura o heladas descritos anteriormente, no se manifiestan en el agua del humedal. Además, estudios adicionales de la variación temporal de marea y caudal en el humedal del río Cruces, evidencian que el nivel del agua en el mismo, no tiene relación con el caudal o la altura del río Cruces, medidos en Rucaco. Consecuentemente, tampoco es posible sugerir que el bajo caudal medido en Rucaco, indica descenso en la altura del agua del humedal, lo cual concuerda con la teoría hidrológica de humedales con influencia estuarial.

La cuantificación del porcentaje de áreas sedimentarias, que quedan expuestas al aire durante la marea baja y en época de bajo caudal en uno de los cauces tributarios del río Cruces, muestra que ese porcentaje es mínimo, considerando la superficie de los bañados o aguas bajas que utilizaba *Egeria densa* en el humedal del río Cruces y cauces tributarios antes del año 2004. Esto no es consistente con lo observado durante ese año: mortalidad masiva del Luchecillo en zonas no expuestas como micro hábitats de aguas someras o bañados, donde aún con marea baja y bajo caudal siempre existe una capa de agua de aproximadamente 20-30 cm, la que evita desecación en las plantas asegurando un equilibrio entre la humedad de la planta y del aire, situación que habría mitigado cualquier eventual efecto de las heladas, cuya frecuencia e intensidad ha sido mayor en períodos anteriores al año 2004. Los resultados de los experimentos de tolerancia de plantas de Luchecillo expuestas a bajas temperaturas, permiten concluir que las plantas de *Egeria densa* del área de estudio son capaces de soportar temperaturas de hasta - 2 °C en un medio acuoso, sin que su funcionalidad fotosintética

sea afectada significativamente. Sin embargo, debe recalcar que estas temperaturas experimentales nunca ocurren en el área de estudio, ya que las temperaturas más bajas del agua son de alrededor de 7 °C. Más aún, en condiciones experimentales, las plantas de Luchecillo pueden soportar temperaturas ambientales extremas (hasta -15 °C en el aire), por al menos dos horas sin presentar variaciones significativas en su funcionalidad, siempre y cuando se encuentren inmersas dentro de un ambiente acuoso. Nuestros resultados indican que 33 % de las plantas mantenidas a -15 °C con agua y por cuatro horas, presentaron valores de Fv/Fm (medida de la salud fisiológica de las plantas) entre 0.70 - 0.80, los cuales son cercanos a los definidos como óptimos. Lo anterior, junto al hecho de que el área del humedal con sedimentos expuestos al aire durante mareas y caudales bajos representa una pequeña fracción de los micro hábitats donde se distribuía *Egeria densa* antes del año 2004 y que en el agua del río Cruces y cauces tributarios raramente se alcanzan temperaturas mas bajas que 7 °C, permite agregar más argumentos a la conclusión de que la hipótesis de Marín *et al.* 2008 (a, b) no tiene evidencia empírica.

Basados en los resultados del presente estudio, se concluye que las variables ambientales propuestas por Marín *et al.* (2008 a, b), no pueden explicar la desaparición masiva de *Egeria densa* en el humedal del río Cruces y cauces tributarios durante el año 2004.

## 2. EL HUMEDAL DEL RIO CRUCES, SANTUARIO DE LA NATURALEZA E INVESTIGACION CIENTIFICA CARLOS ANWANDTER

### 2.1. Los cambios ambientales ocurrientes en el humedal del río Cruces durante el año 2004

Durante el invierno del año 2004, se observó en el humedal del Río Cruces una alta tasa de emigración y mortalidad por causas desconocidas del Cisne de cuello negro (*Cygnus melancorhyphus*), situación acompañada por la ausencia de nidos y polluelos de la misma especie.



El humedal albergaba una población promedio aproximada de 6000 cisnes (datos no publicados de CONAF; ver [www.conaf.cl](http://www.conaf.cl)) y se le conocía como el principal sitio reproductivo de esta especie en el área neotropical de Sudamérica, razón sostenida por el Gobierno Chileno al gestionar su inclusión en la lista de humedales Ramsar, aparte de la alta diversidad de aves y macrófitas acuáticas presentes en el área.

Junto a la alta emigración y mortalidad por causas desconocidas del Cisne de cuello negro, se observó también una reducción significativa en la distribución espacial y cobertura de la macrófita conocida localmente como Luchecillo (*Egeria densa*), fuente primaria de alimento para los Cisnes de cuello negro y otras aves herbívoras como taguas (*Fulica armillata*) y taguitas (*Gallinula melanops*) (Corti & Schlatter, 2002), especies cuyas abundancias poblacionales representaban cerca del 95% del total de la avifauna del humedal (ver [www.conaf.cl](http://www.conaf.cl)).



Debido a la desaparición del Luchecillo, vastas extensiones del humedal del río Cruces y cauces tributarios quedaron desprovistas de cobertura de plantas acuáticas (Luchecillo), lo que ha resultado en resuspensión de los sedimentos, especialmente en el área media y superior del humedal.



Finalmente, durante la primavera del año 2004 y el período estival del año 2005, aguas turbias color marrón con altas concentraciones de sólidos suspendidos y metales pesados (primariamente hierro, aluminio y manganeso), se desplazaron desde el humedal del río Cruces y cauces tributarios, a las aguas adyacentes del canal mareal Cau Cau y ríos Calle Calle y Valdivia. La distribución espacial de esta aguas, cuyas características físico-químicas son similares de superficie a fondo, añaden otro gradiente ambiental al ya presente en el humedal debido al carácter estuarial del mismo.



## 2.2. Las conclusiones de los estudios de la Universidad Austral de Chile

Con el objetivo de evaluar el origen de los cambios ambientales ocurrientes en este sitio Ramsar, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), contrató a la Universidad Austral de Chile en Noviembre del año 2004, para llevar a cabo el “Estudio sobre origen de mortalidades y disminución poblacional de aves acuáticas en el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter, en la provincia de Valdivia” (Convenio Complementario Específico N° 1210-1203/2004-12-14), cuyas principales conclusiones fueron (UACH 2005; Jaramillo *et al.* 2007):

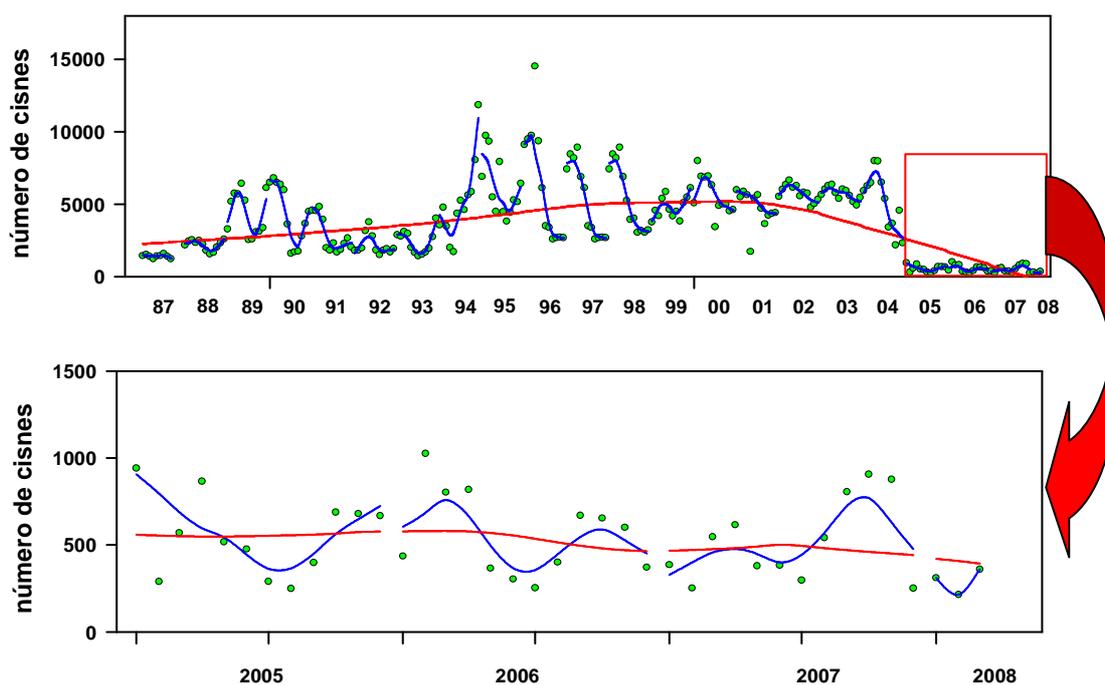
- i) Los Cisnes de cuello negro murieron de emaciación o enflaquecimiento extremo - debido a la desaparición de su alimento, el Luchecillo - acompañada de intoxicación por hierro (hemocromatosis) y una alta carga parasitaria.
- ii) La abundancia poblacional de otras aves herbívoras como Taguas y Taguitas, también resultó afectada por la desaparición del Luchecillo.
- iii) El Luchecillo fue afectado negativamente por la alta carga de metales pesados (primariamente hierro), que se depositó sobre sus hojas.
- iv) La causa más probable de la precipitación de esos metales, estuvo relacionada a las altas cargas de químicos provenientes de la planta Valdivia de Celulosa Arauco y Constitución S.A., ubicada aproximadamente 20 Km aguas arriba del humedal.
- v) La calidad de agua del río Cruces cambió significativamente, después que esa planta empezó a producir celulosa en Febrero del año 2004.
- vi) Fenómenos naturales de macroescala y que operan más allá de la cuenca del río Cruces (e.g. radiación ultravioleta, cambios interanuales en

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

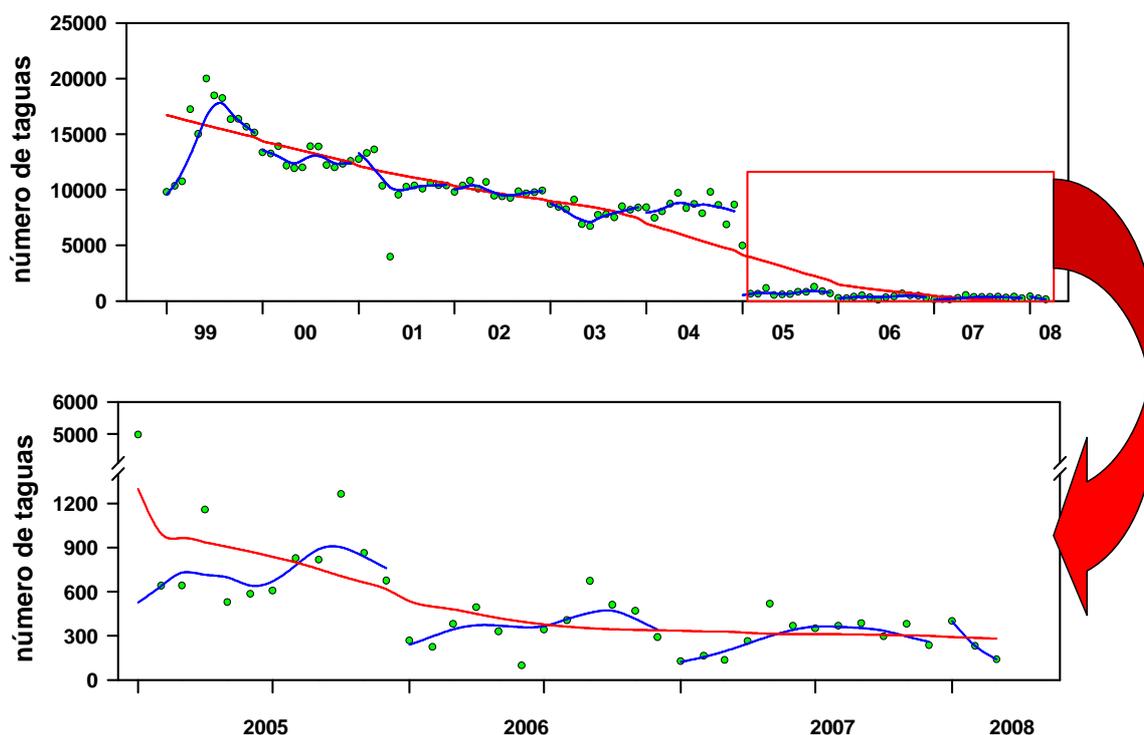
precipitaciones y caudales hídricos), no estuvieron involucrados en los cambios ambientales que se originaron durante el año 2004 en el humedal del río Cruces y cauces tributarios.

Estudios posteriores realizados entre los años 2005 a 2007, permitieron obtener las siguientes conclusiones acerca del estado del humedal:

- i) No hay recuperación de las abundancias poblacionales de aves herbívoras (Cisnes de cuello negro y taguas). Durante los años 2005, 2006 y 2007, los rangos en la variabilidad de las abundancias mensuales de cisnes fueron similares: 940-249, 1026-253 y 907-251 aves, respectivamente (Fig. 1). Por el contrario, los rangos para las taguas disminuyeron desde el año 2005 (4980-529) a los años 2006 (673-98) y 2007 (518-135) (Fig.2).



**Figura 1.** Variabilidad temporal en las abundancias poblacionales de Cisnes de cuello negro en el humedal del río Cruces y cauces tributarios. Nótese que durante el período 2005-2007, la tendencia en las abundancias poblacionales (línea roja) fue similar.



**Figura 2.** Variabilidad temporal en las abundancias poblacionales de taguas en el humedal del río Cruces y cauces tributarios. Nótese la tendencia sostenida a la disminución (línea roja) en las abundancias poblacionales.

- ii) Aún cuando bajísima, la actividad reproductiva se reinició (verano 2007), después de tres años de haber estado interrumpida.
- iii) Persiste la hemocromatosis en cisnes; estudios recientes sugieren que esta patología también está afectando a las taguas (ver Informe UACH 2007).
- iv) Plantas sanas provenientes del río Calle Calle y mantenidas dentro del humedal, adquieren altas cargas de metales pesados y manchas necróticas, similar a lo observado al inicio de los cambios ambientales (ver Informe UACH 2005).
- v) No hay recuperación de Luchecillo en la mayor parte del humedal. Muestreos realizados durante el 15 y 16 de Junio del año 2008 en 42 estaciones de

muestreo ubicadas en el río Cruces y cauces tributarios (Tabla 1), indican que solo en tres de ellas (estación 25: río Cayumapu 1, estación 34: San Ramón 2 y estación 38: Punucapa 2) se detectaron manchones aislados de Luchecillo. Por el contrario, en gran parte de las estaciones de muestreo ubicadas en los ríos Calle Calle y Valdivia se detectó la presencia de esta macrófita acuática (Tabla 1).

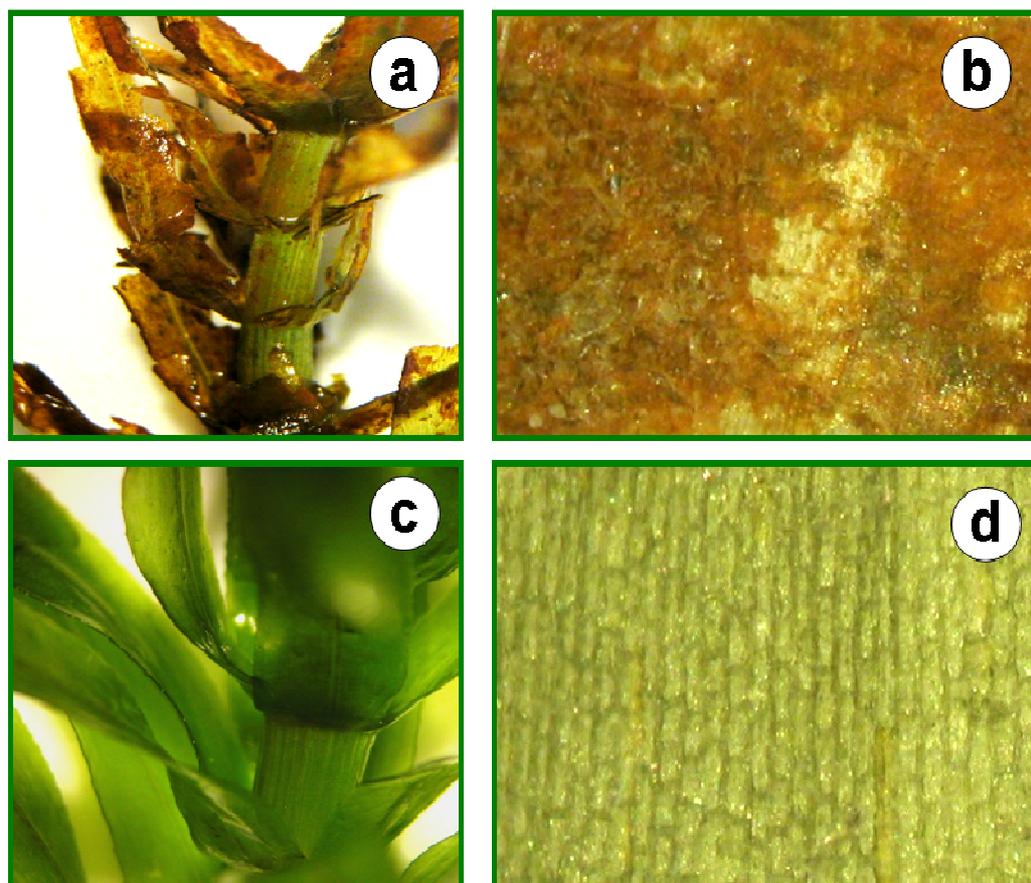
**Tabla 1.** Presencia y ausencia de Luchecillo en los sitios visitados en el río Cruces, tributarios del mismo, canal mareal Cau Cau y ríos Calle Calle y Valdivia, durante Junio del año 2008. A = plantas ausentes, P = plantas presentes (marcado en amarillo).

estación	ríos y sectores	ubicación geográfica		
	humedal del río Cruces y cauces tributarios	latitud	longitud	Junio 2008
1	río San José	659392	5615228	A
2	500 m aguas arriba de orilla del Fuerte San Luis	659627	5615139	A
3	confluencia del río Cruces con el río San José	658913	5614474	A
4	orilla del Fuerte San Luis	658771	5614406	A
5	sitio histórico de muestreo	657992	5613256	A
6	sector San Martín 1	655872	5611088	A
7	sector San Martín 2	655802	5610409	A
8	Santa María, muelle largo	656009	5608697	A
9	río Nanihue	658085	5609720	A
10	confluencia del río Nanihue con el río Cudico	657734	5608201	A
11	río Cudico 1	659916	5609219	A
12	río Cudico 2	658420	5608661	A
13	sector San Antonio	657475	5607236	A
14	río Santa María	653343	5606447	A
15	sector Santa María 1	654489	5606360	A
16	Sector Santa María 2	654629	5604654	A
17	río Pichoy 1	662172	5605393	A
18	río Pichoy 2	660609	5603331	A
19	río Pichoy 3	659700	5603191	A
20	río Pichoy 4	657135	5603724	A
21	río Tambillo	651020	5604004	A
22	sector Tambillo	650968	5601666	A
23	Rialejo	653336	5603432	A
24	Puerto Claro	652424	5601891	A
<b>25</b>	<b>río Cayumapu 1</b>	661215	5601113	<b>P</b>
26	río Cayumapu 2	659833	5601001	A
27	río Cayumapu 3	659269	5599469	A
28	río Cayumapu 4	655685	5600736	A
29	confluencia del río Cruces con el río Cayumapu	655113	5601626	A
30	Chorocamayo	652178	5600646	A
31	orilla Fundo La Dehesa 1	650446	5599305	A
32	orilla fundo La Dehesa 2	650097	5598055	A
33	San Ramón 1	647535	5600249	<b>P</b>
<b>34</b>	<b>San Ramón 2</b>	647723	5599987	A
35	San Ramón 3	648005	5599985	A
36	San Ramón 4	648898	5599791	A
37	Punucapa 1	648238	5598492	<b>P</b>
<b>38</b>	<b>Punucapa 2</b>	648361	5598281	A
39	Punucapa 3	649094	5597338	A
40	Cabo Blanco	649724	5595645	A
41	500 m aguas arriba del Puente Cruces	647892	5590311	A
42	120 m aguas abajo del Puente Cruces	648350	5589930	A

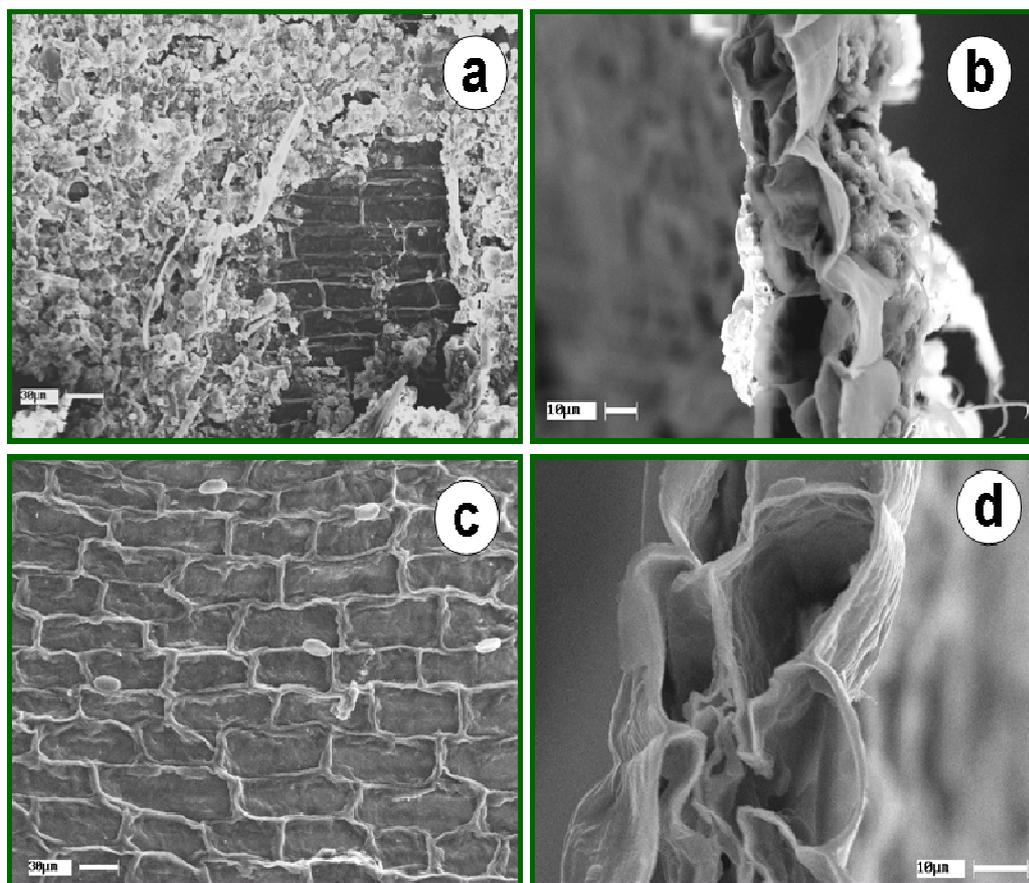
Continuación Tabla 1

estación	ríos y sectores	ubicación geográfica		Junio 2008
		latitud	longitud	
<b>canal mareal Cau Cau</b>				
43	confluencia del río Cruces con canal mareal Cau	648440	5594654	A
44	muelle Teja Norte	649236	5593322	A
45	Marina Fibronaval	650238	5592525	P
<b>río Calle Calle</b>				
46	orilla Aguas Décima	655750	5594086	P
47	orilla frente Restaraunte Guata Amarilla	653072	5593415	P
48	orilla Gruta de Lourdes	652957	5593136	P
49	Áridos Las Animas	652919	5591500	P
50	Playa Las Animas	651703	5590848	P
51	Restaurante Fogón Palestino	651392	5591388	P
52	costanera frente Terminal de Buses	651107	5591328	P
53	costanera frente Calle García Reyes	650865	5591607	A
<b>río Valdivia</b>				
54	costanera, frente Facultad Arquitectura UACH	650253	5591993	P
55	costanera, orilla Mercado Fluvial	649918	5591575	A
56	costanera, orilla Gobernación Marítima	649879	5591367	A
57	orilla Corporación Cultural	649853	5591167	P
58	Club de Yates	649682	5590308	P
59	Islote Haverbeck, cerca hotel Naguilán	649507	5589888	A
60	Canal Haverbeck, orilla Miraflores	649648	5589768	A

- vi) Tal como observado durante el año 2004 (Informe UACH 2005), plantas de Luchecillo provenientes del humedal del río Cruces (estación 25: río Cayumapu 1, estación 34: San Ramón 2 y estación 38: Punucapa 2) muestran áreas necróticas de color café atribuibles a altas cargas de hierro. Por el contrario, plantas recolectadas en las orillas del río Calle Calle muestran un color verde y aspecto saludable. Las Figuras 3 y 4 dan cuenta de esas diferencias.



**Figura 3.** Vistas *in toto* y superficie de las hojas de plantas de Luchecillo recolectadas en el humedal del río Cruces (a y b) y río Calle Calle (c y d). La muestra del humedal corresponde a planta obtenida durante Febrero del año 2008 en la estación 34 (San Ramón 2), a la vez que la del río Calle Calle representa a una planta recolectada en el mismo período en la estación 46 (orilla Aguas Décima) (cf. Tabla 1).



**Figura 4.** Fotografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido de hojas de plantas de Luchecillo recolectadas en el humedal del río Cruces (a y b) y en el río Calle Calle (c y d). La muestra del humedal corresponde a planta obtenida durante Febrero del año 2008 en la estación 34 (San Ramón 2), a la vez que la del río Calle Calle representa a una planta recolectada en el mismo período en la estación 46 (orilla Aguas Décima) (cf. Tabla 1). a y c son vistas de la cara superior de esas hojas, a la vez que b y d son vistas de cortes transversales.

- vii) Similar a lo estudiado durante el año 2004 (Informe UACH 2005), plantas de Luchecillo provenientes del humedal del río Cruces, tienen contenidos de metales pesados significativamente más altos que plantas recolectadas en el río Calle Calle (Tabla 2).

**Tabla 2.** Concentración de metales pesados (mg/kg peso seco de planta) en plantas recolectadas en el humedal del río Cruces y cauces tributarios (n =3; estaciones 25, 34 y 38; cf. Tabla 1) y en el río Calle Calle (n=5; estaciones 46, 47, 49, 51 y 52; cf. Tabla 1) durante Febrero del año 2008. Origen de los datos: SERNAGEOMIN, Certificado de análisis n° 2008-112 de fecha 25 de Julio, 2008. Los valores son promedios con desviación estándar en paréntesis. Se entregan los valores de F y P resultantes de los análisis de varianza (ANDEVA), tendientes a evaluar eventuales diferencias entre promedios. Los promedios que difieren significativamente entre sí (ver valores de F y P) se indican con negrilla.

	plantas provenientes de:		
	humedal del río Cruces y cauces tributarios	río Calle Calle	ANDEVA
<b>Hierro</b>	<b>60350.9 (23823.6)</b>	<b>3900.3 (803.1)</b>	<b>F=167.61, P&lt;0.0001</b>
<b>Aluminio</b>	<b>9837.4 (5873.6)</b>	<b>2774.6 (716.1)</b>	<b>F=16.17, P=0.0069</b>
Manganeso	5656.8 (4965.3)	1800.8 (467.6)	F=4.18, P=0.0707
Zinc	53.6 (5.1)	73.3 (36.5)	F=0.81, P=0.4022
<b>Cobre</b>	<b>20.3 (3.9)</b>	<b>14.0 (3.9)</b>	<b>F=5.05, P=0.0001</b>
Níquel	6.4 (2.8)	3.7 (1.0)	F=4.31, P=0.0833
<b>Arsénico</b>	<b>12.5 (1.9)</b>	<b>3.4 (0.8)</b>	<b>F=106.19, P&lt;0.001</b>
<b>Cromo</b>	<b>9.6 (1.5)</b>	<b>3.4 (0.8)</b>	<b>F=56.16, P=0.0003</b>
<b>Plomo</b>	<b>7.3 (1.5)</b>	<b>3.1 (0.9)</b>	<b>F=26.05, P=0.0022</b>
Cadmio	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	F=0.37, P=0.5632
Mercurio	0.0	0.0	
<b>carga total</b>	<b>75955.1</b>	<b>8576.8</b>	<b>F=66.81, P=0.0002</b>

- viii) El análisis comparativo de imágenes satelitales, muestra que los cambios de coloración observados en el humedal del río Cruces corresponden a un fenómeno reciente (*post 2004*) (Lagos *et al.* 2008 a).

- ix) Las aguas color marrón que ocurren primariamente durante el período estival, tienen una alta carga de metales pesados, primariamente hierro, aluminio y manganeso.

### **3. EL ESTUDIO “ELABORACION DE UN MODELO CONCEPTUAL DEL ECOSISTEMA DEL HUMEDAL DEL RIO CRUCES” (Facultad de Ciencias, Universidad de Chile)**

#### **3.1. Antecedentes**

Con fecha 14 de Septiembre de 2007, se firmó el contrato entre la Corporación Nacional Forestal y la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile (UCh de aquí en adelante) para el desarrollo del proyecto “Elaboración de un modelo conceptual del ecosistema del humedal del río Cruces”, según número de adquisición ID 633-111-LP07 (tomado de Informe Final del Proyecto (Abril 2008), página 4). Más antecedentes pueden consultarse en la página web del Proyecto <http://ecosistemas.uchile.cl/cruces/>.

Un estudio de este tipo había sido incluido en el Programa Integral de Gestión Ambiental (PIGA) del humedal del río Cruces, por parte de la CONAF (ver [www.conaf.cl](http://www.conaf.cl)).

#### **3.2. Objetivos**

Los objetivos de este estudio fueron (tomados de página 5 del Informe Final del Proyecto entregado por la UCh en Abril del año 2008):

- Desarrollar diagramas (observador-dependiente) de componentes y flujos del ecosistema del humedal del río Cruces en una representación dinámica del mismo.
- Identificar las variables de estado que determinen las características del ecosistema del humedal.

- Identificar las variables forzantes que dinamizan el ecosistema del humedal.
- Valorar hipótesis (observador-dependiente) sobre perturbaciones.
- Desarrollar una estrategia de apoyo a las decisiones del Plan en el marco del Modelo Conceptual.
- Capacitar a las instituciones públicas y privadas respecto del modelo, sus cualidades y funciones y como modificarlo de una forma adaptativa.

### **3.3. La hipótesis de Marín et al. (2008 a, b)**

En la página 66 del Segundo Informe de Avance de la UCh (Marzo 2008), Marín et al. (2008 a) llegan a la conclusión que se transcribe más abajo (copia textual entre comillas, en negrilla y cursiva), luego de analizar las características meteorológicas e hidrológicas del área del humedal, además de diversas fuentes bibliográficas relacionadas con factores ambientales considerados como importantes en la sobrevivencia de *Egeria densa* en otras regiones geográficas:

***“Por tanto, el análisis de la información meteorológica e hidrológica presentado en este subcapítulo, permite proponer que durante el mes de mayo de 2004 se produjeron en la zona del humedal de río Cruces las tres condiciones que, para otros ecosistemas, han demostrado erradicar a Egeria densa: (1) bajos caudales que producen exposición de los sedimentos en zonas bajas (bañados), (2) ausencia de lluvias y, (3) tres eventos fríos”.***

La Figura siguiente ha sido tomada del Segundo Informe de la UCh (Fig. 10 en ese informe) y complementa lo citado anteriormente.

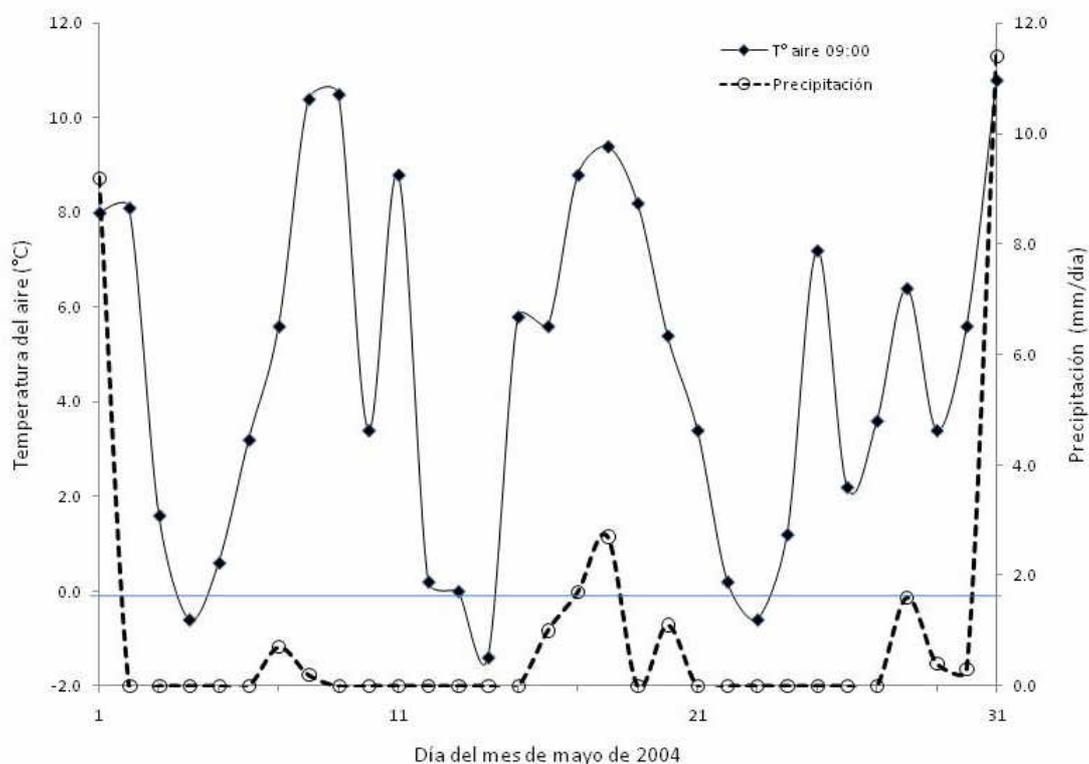


Figura 10. Información meteorológica de la zona del humedal de río Cruces para mayo de 2004. Los datos provienen de la estación meteorológica del Aeropuerto Pichoy.

Conclusiones similares son las que aparecen en las páginas 30 y 31 del Informe Final del Proyecto de la UCh (Abril 2008), bajo el punto 5.2 Meteorología e hidrología y donde Marín *et al.* (2008 b) escriben (copia textual, transcrita entre comillas, en negrilla y cursiva):

***“En el segundo informe de avance<sup>7</sup> se presentó una hipótesis integradora de varias de las hipótesis anteriormente disponibles respecto de los eventos que ocurrieron en el humedal del río Cruces en el año 2004. En el mismo informe se fundamentó nuestra conclusión respecto que el denominado “evento inicial”, aquél que gatilló el cambio de estado o régimen del ecosistema del humedal (ver 6.1), habría ocurrido en el mes de mayo. Sin embargo, aún queda la pregunta sobre si las condiciones que gatillaron el cambio solo se ocurrieron el año 2004 o si habrían ocurrido antes.***

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

Anteriormente sostuvimos<sup>7</sup>, sobre la base de la literatura disponible, que se requiere más de una condición para erradicar a *Egeria densa* de un ecosistema. Como todas ellas se relacionan con la meteorología y la hidrología de la zona, acudimos a la información disponible en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile disponible en Internet (Aceituno, 2008) y a la base de datos sobre caudales del río Cruces disponible en el portal de la Dirección General de Aguas (<http://www.dga.cl>). La información ha sido resumida en la Tabla 1 donde se comparan las condiciones para los meses de mayo 2000-2004 y puede ser sintetizada en los siguientes puntos:

1. Se requiere que los sedimentos y las plantas sean afectados por más de un evento de baja temperatura (primera columna Tabla 1).
2. Aún cuando hubiesen bajas temperaturas, su efecto no será intenso si se produce en conjunto con precipitaciones. Por esta razón se analizó si se produjeron bajas precipitaciones durante los meses de mayo (segunda columna).
3. Si las dos condiciones anteriores se producen, aún se requiere que los sedimentos queden expuestos. Ello sólo ocurre durante condiciones de bajo caudal (tercera columna Tabla 1).

**Tabla 1. Condiciones para la disminución de la cobertura de *Egeria densa* en el humedal de río Cruces analizada para el mes de mayo.**

<b>Año</b>	<b>Eventos de baja temperatura</b>	<b>Baja precipitación</b>	<b>Bajo caudal</b>
<b>2000</b>	<b>+ (1)</b>	<b>+</b>	<b>+</b>
<b>2001</b>	<b>¿</b>	<b>¿</b>	<b>-</b>
<b>2002</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>2003</b>	<b>+ (1)</b>	<b>+</b>	<b>+</b>
<b>2004</b>	<b>+ (3)</b>	<b>+</b>	<b>+</b>

***La información disponible muestra que solo durante el 2004 se produjeron todas las condiciones meteorológicas e hidrológicas que, de acuerdo a la literatura, pueden erradicar a Egeria densa de un ecosistema. En los años anteriores (2000-2003) al menos una de ellas no se cumplió. Por ejemplo, para mayo de 2000 y 2003 se produjo un solo evento de temperatura fría. Cuando se comparan el 2003 y el 2004 los datos de las 09:00 AM del aeropuerto Pichoy muestran algo similar (Fig. 3).***

***De la misma forma resulta ilustrativo analizar las anomalías para el caudal del río durante los meses de mayo. La Figura 4 muestra los resultados del análisis de los datos de la estación “río Cruces en Rucaco” (Código BNA 10134001, DGA) para el período 1969-2004. Los datos muestran una variación cíclica, aunque amortiguada, con una tendencia leve ( $p=0,1$ ) de largo plazo a la disminución en el tiempo. De hecho a partir de 1997 los caudales de mayo en el río Cruces han sido rara vez positivos (mayo 2001, anomalía =  $1,59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Vale decir, pareciera existir una tendencia a la disminución del caudal durante el mes de mayo. Si esto es debido solo a factores climáticos de gran escala (e.g. El Niño Oscilación del Sur) o es también afectado por efectos antropogénicos (e.g. uso del agua) es un tema que excede a los objetivos de este informe (ver comentarios en 6.3)”:***

Las Figuras siguientes han sido tomadas del Informe Final de la UCh (Fig. 3 y 4 en ese informe) y complementan lo citado anteriormente.

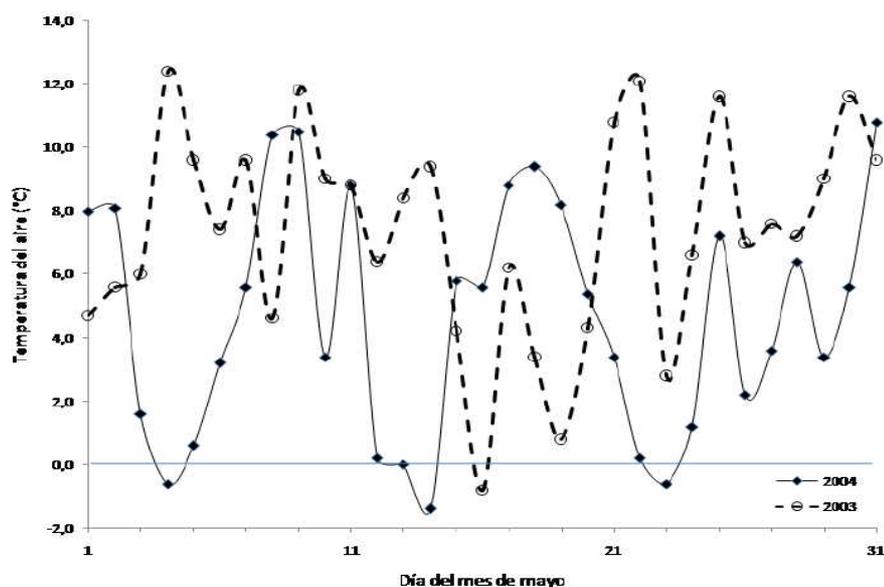


Figura 3. Variación diaria de la temperatura del mes de mayo para los años 2003 y 2004. Los datos provienen de la estación del Aeropuerto Pichoy de Valdivia y corresponden a mediciones realizadas a las 09:00 AM. La línea azul corresponde a los cero °C, bajo la cual se pueden ver los eventos fríos para cada año.

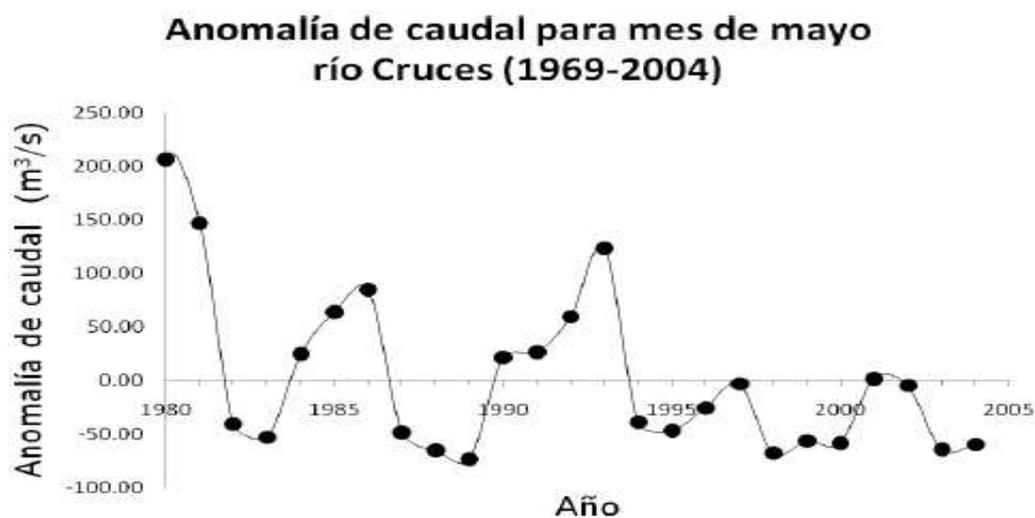


Figura 4. Anomalía del caudal del río Cruces para los meses de mayo 1969-2004. Datos provenientes de la estación RUCACO de la DGA.

En conclusión, Marín *et al.* (2008 a, b) hipotetizan que los cambios observados en el humedal del río Cruces durante el año 2004, estuvieron relacionados a variabilidad ambiental de tipo natural; específicamente, la ocurrencia simultánea de eventos con bajas temperaturas, ausencia de precipitaciones y bajo caudal del río Cruces, habría iniciado la mortalidad masiva de *Egeria densa*.

### **3.4. Observaciones al estudio de Marín *et al.* (2008 a, b)**

A continuación se revisan algunos aspectos del Informe de Marín *et al.* (2008 a, b), que debilitan significativamente sus conclusiones y/o las predicciones que se derivan de su hipótesis.

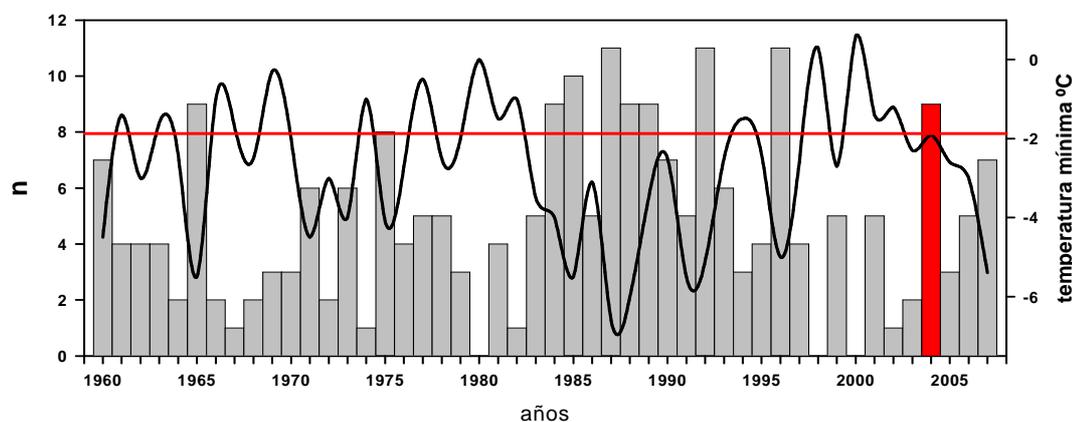
#### ***En relación a meteorología:***

- i) Marín *et al.* (2008 b) utilizan datos del periodo 2000 a 2004 para analizar las **“Condiciones para la disminución de la cobertura de *Egeria densa* en el humedal de río Cruces para el mes de mayo”** (encabezado de Tabla 1, pág. 31 del Informe Final de la UCh) y postular que la ocurrencia simultánea de eventos con bajas temperaturas, ausencia de precipitaciones y bajo caudal del río Cruces serían los gatillantes de la mortalidad masiva de *Egeria densa*.

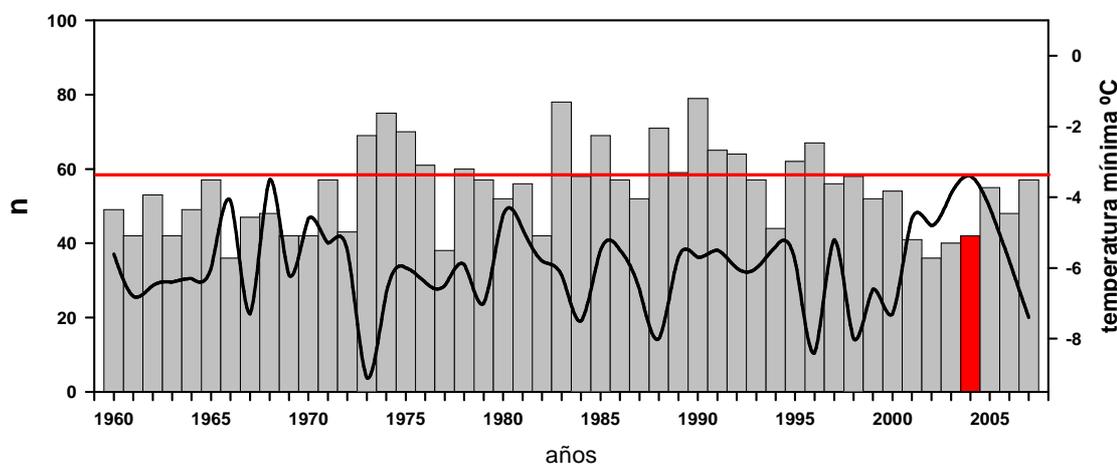
Sin embargo, la información meteorológica disponible en el Instituto de Geociencias de la UACH, evidencia una importante variación interanual en, por ejemplo, la frecuencia de eventos de heladas en Valdivia (ver punto 6.2. de este Informe); por consiguiente, fundamentar la hipótesis de Marín *et al.* (2008 a, b) con sólo cinco años de datos, es carente de alcance y generalidad, en relación al entendimiento de las condiciones meteorológicas que históricamente han dominado en el área de Valdivia.

- ii) Así mismo, la frecuencia e intensidad de las heladas ocurridas durante Mayo del año 2004, fue menor a las registradas en el mismo mes de varios años anteriores

(Fig. 5). Al comparar la ocurrencia de heladas durante el año 2004 con los datos registrados en las últimas cuatro décadas se evidencia que en años anteriores ocurrieron heladas en forma más frecuente y de mayor intensidad (Fig. 6).



**Figura 5.** Frecuencia (n) e intensidad de heladas en Valdivia: comparación de Mayo del año 2004 (columna en rojo) *versus* Mayo de otros años. La línea roja horizontal indica el valor de la helada más intensa (temperatura más baja) durante Mayo del año 2004 (- 1.8 °C), a la vez que la línea negra une los valores de las temperaturas más bajas durante Mayo de otros años.



**Figura 6.** Frecuencia (n) e intensidad de heladas: comparación del año 2004 (columna en rojo) *versus* otros años. La línea roja horizontal indica el valor de la helada más intensa (temperatura más baja) durante el año 2004 (- 3.8 °C), a la vez que la línea negra une los valores de las heladas más intensas durante los otros años comparados.

- iii) La hipótesis de Marín *et al.* (2008 a, b) supone que la intensidad de las heladas es uniforme en todo el humedal del río Cruces. Sin embargo, la heterogeneidad

ambiental de los bordes del río Cruces y cauces tributarios (e.g., diferencias en cobertura vegetal), determina que la intensidad de la irradiación terrestre sea diferente a través del mismo y por lo tanto que la distribución espacial de las heladas en áreas de aguas someras o bañados sea heterogénea. Más aún, la topografía, formación de neblina, viento y las corrientes o movimientos del agua en o cerca de la zona de bañados y el gradiente ambiental resultante de la influencia estuarial, influye sobre la distribución espacial de la intensidad de las heladas. En consecuencia, no es esperable que el efecto de las bajas temperaturas del aire registradas durante Mayo del año 2004, haya sido espacialmente generalizado.

- iv) La hipótesis de Marín *et al.* (2008 a, b) supone que la temperatura mínima el aire a sólo centímetros sobre la superficie del agua alcanza los mismos valores que la del aire sobre la tierra. Esto no es correcto, ya que el agua tiene un calor específico mucho mayor que el del suelo (1 cal/g *versus* 0.2 a 0.4 cal/g, respectivamente); consecuentemente, la superficie del agua está expuesta a un menor enfriamiento y nunca alcanza cero °C. Si la superficie del río se congelara, sería algo que contradice toda nuestra experiencia empírica en el área.

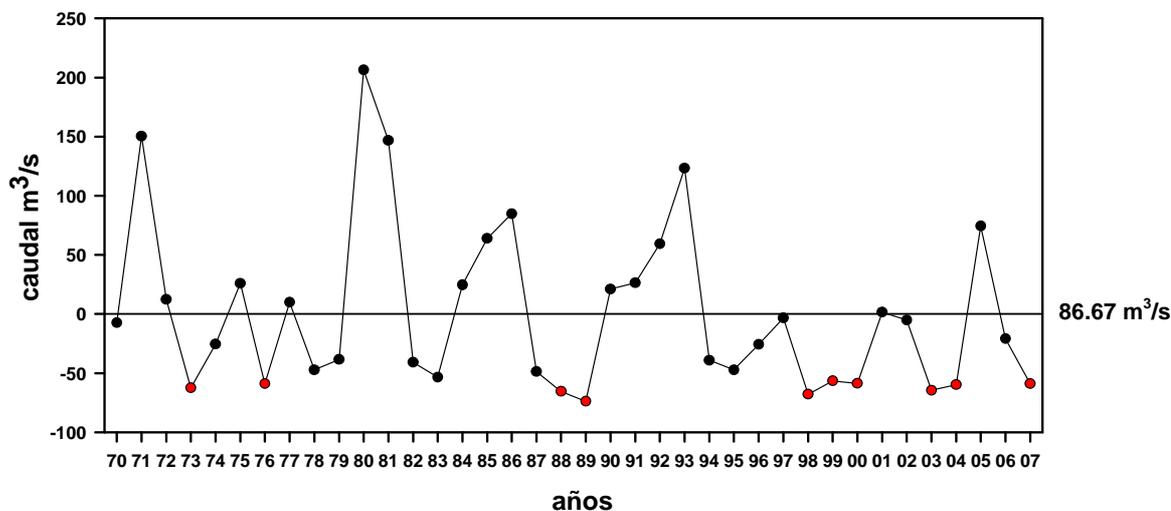
***En relación a caudales y mareas:***

- i) La Figura 4 del informe de Marín *et al.* (2008 b, pág. 33) y reproducida más abajo, presenta la anomalía del caudal río Cruces para los meses de Mayo del período 1980 - 2004 (nótese error en el encabezado y leyenda de ese gráfico). Aludiendo a este gráfico de caudales del río Cruces, Marín *et al.* (2008 b) sostienen: ***“La Figura 4 muestra los resultados del análisis de los datos de la estación ”río Cruces en Rucaco” (Código BNA 10134001, DGA) para el período 1969-2004. Los datos muestran una variación cíclica, aunque amortiguada, con una tendencia leve ( $p=0,1$ ) de largo plazo a la disminución en el tiempo. De hecho a partir de 1997 los caudales de mayo en el río Cruces han sido rara vez positivos (mayo 2001, anomalía = 1,59***

$m^3s^{-1}$ ). Vale decir, pareciera existir una tendencia a la disminución del caudal durante el mes de mayo” (páginas 31 y 32 del Informe Final de la UCH). Es decir, para Marín *et al.* (2008 a, b), Mayo del año 2004 fue un mes donde el caudal del río Cruces fue particularmente bajo. Sin embargo, anomalías negativas de caudal similares y aún mayores que las registradas en Mayo del año 2004, han sido registradas en varias ocasiones durante el periodo 1970 a 2007 (Figura 7). Más aún, la tendencia negativa a la que aluden Marín *et al.* (2008 b) probablemente se deba a la omisión del periodo 1969 a 1979 y que sólo se haya analizado el periodo 1980 - 2004, ya que el valor máximo de anomalía positiva de caudal registrado en 1980, sugiere una tendencia negativa en relación a las anomalías negativas observadas en la última década. Sin embargo, esta tendencia negativa no es significativa, por lo tanto, no es un hecho sino un supuesto conveniente a la fundamentación de la hipótesis de Marín *et al.* (2008 b).

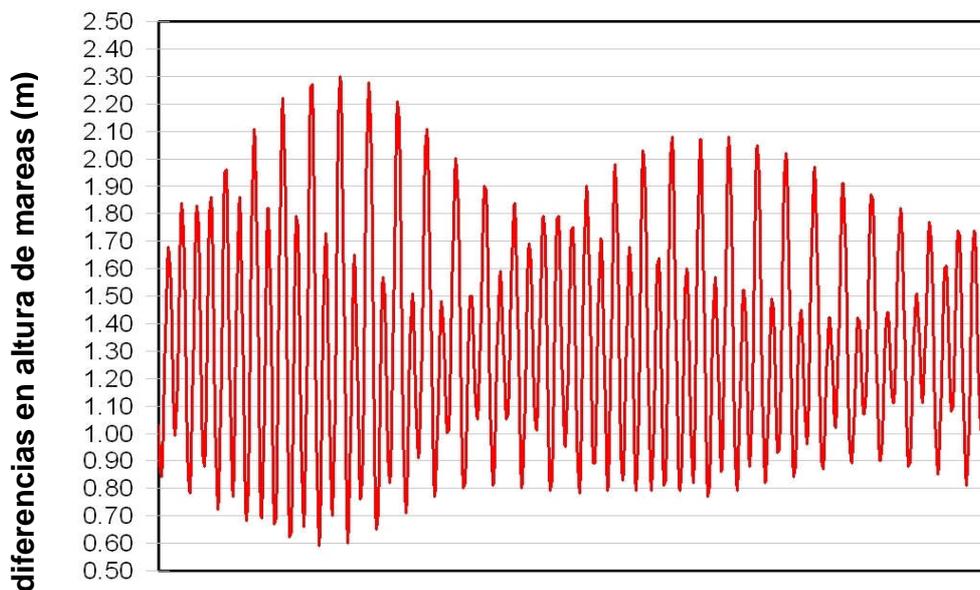


Figura 4. Anomalía del caudal del río Cruces para los meses de mayo 1969-2004. Datos provenientes de la estación RUCACO de la DGA.



**Figura 7.** Variabilidad interanual del caudal del río Cruces en Rucaco durante el mes de Mayo. Los datos se grafican en relación al promedio histórico para ese mes ( $86.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Los círculos rojos son años en que los valores de caudal del río durante Mayo de otros años fueron similares al de Mayo del año 2004.

- ii) En la página 41 del Informe de Marín *et al.* (2008 b), se sostiene que: ***“Dadas las características hidráulicas de la zona, las condiciones del escurrimiento están gobernadas por la altura de agua impuesta por el nivel del mar, el que varía a lo largo del día de acuerdo con la marea, con un período de 12 hrs, aproximadamente”***. Sin embargo, esto no es correcto. Las mareas no solo varían cada hora, también cada siete días e incluso en períodos más largos y con enormes diferencias entre las mareas diurnas y nocturnas. Un ciclo de marea se mide desde cualquier punto de la onda al punto de igual altura que le sucede (12.3 horas) y la variación máxima ocurre cada 6.15 horas (de una bajamar a una pleamar y *viceversa*). A modo de ejemplo se presenta la figura siguiente que representa la marea para Mayo del año 2008 en Corral, Valdivia. Se observan claramente las diferencias semidiurnas, la variabilidad entre mareas de sicigia (mayor diferencia en altura de la marea) y cuadratura (menor diferencia en altura de la marea) y que a veces, durante mareas diurnas la diferencia entre la marea alta y marea baja es de solo 30 cm.



- iii) En la misma página 41 del Informe Final del estudio de la UCh (Marín *et al.* 2008 b), se menciona: ***“En cambio, las crecidas invernales, si bien producen efectos similares a los asociados a la marea en términos de aumento de niveles o velocidades de escurrimiento en el sistema, tienen un mayor impacto, debido a que los caudales pueden llegar a ser varios órdenes de magnitud mayores a los de condiciones normales (Figura 7)”***. Esto no es correcto, ya que como se describe en el punto 6.4 de este informe, el aumento del caudal del río no tiene relación alguna con aumento de velocidades y arrastre, eso lo hace la marea, ya que esta jamás desaparece por efecto del caudal. Puede haber sinergia y ocurrir mareas altas excepcionales fuera de la predicción astronómica, pero las mareas bajas siempre serán al menos más altas que las predichas (ver Pethick 1984).
- iv) Otro error conceptual aparece en la misma página 41 del Informe Final de la UCh (Marín *et al.* 2008 b) cuando se menciona: ***“El aumento del caudal en el río implica un aumento en las velocidades y alturas de escurrimiento, favoreciendo los procesos de arrastre de sedimento, erosión, arrastre de***

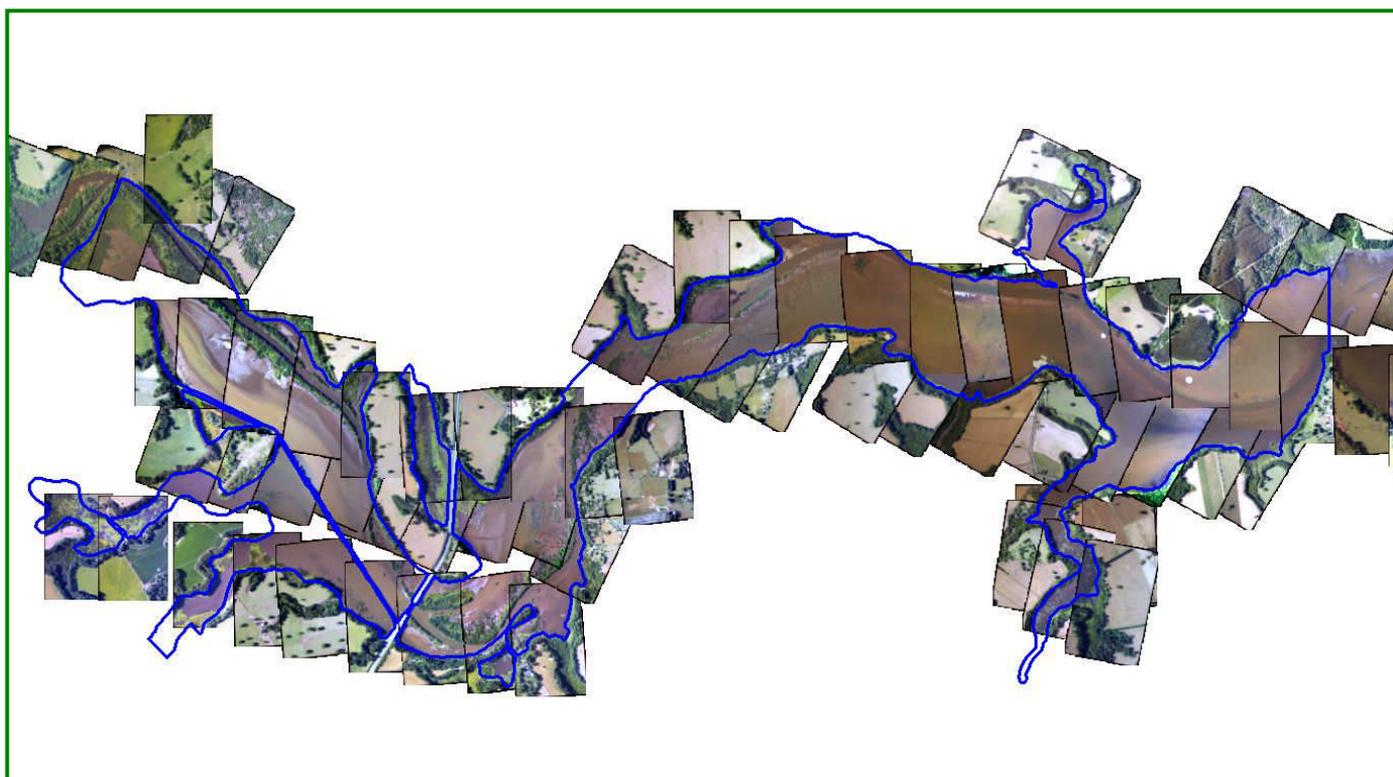
**vegetación, y lavado del sistema por el ingreso masivo de agua dulce**". Lo anterior demuestra un conocimiento débil de ecosistemas estuariales, como es el caso del humedal del río Cruces. Es necesario enfatizar que todos los procesos estuariales, están regidos por la energía mareal, en este caso de magnitud mayor que la energía del río. Más aún, es la energía mareal la que permite que los estuarios sean lugares de depositación, en otras palabras "trampas" naturales de sedimentos. Los eventos que originan erosión en los fondos de un estuario son raros y están referidos a la desestabilización de las fuerzas eléctricas entre moléculas de arcilla, que en condiciones normales requieren de velocidades mayores a 1 m/s para que ocurra resuspensión.

- v) En la página 43 del Informe Final del estudio de la UCh (Marín *et al.* 2008 b) se escribe: **"En el río Valdivia existen antecedentes que indican la presencia de una cuña salina (es decir, una alta estratificación vertical con una capa profunda de alta salinidad) .....**". Esto representa otro error conceptual de ese estudio, ya que los estuarios del sur de Chile no son del tipo cuña salina, sino que corresponden a estuarios de mezcla parcial, donde independiente del gradiente existente, la variación en la concentración de sales es gradual de superficie a fondo (ver e.g. Pethick 1984). La salinidad en la entrada del humedal (confluencia del río Cruces con el canal mareal Cau Cau) jamás sobrepasa 1 PSU en las aguas del fondo.

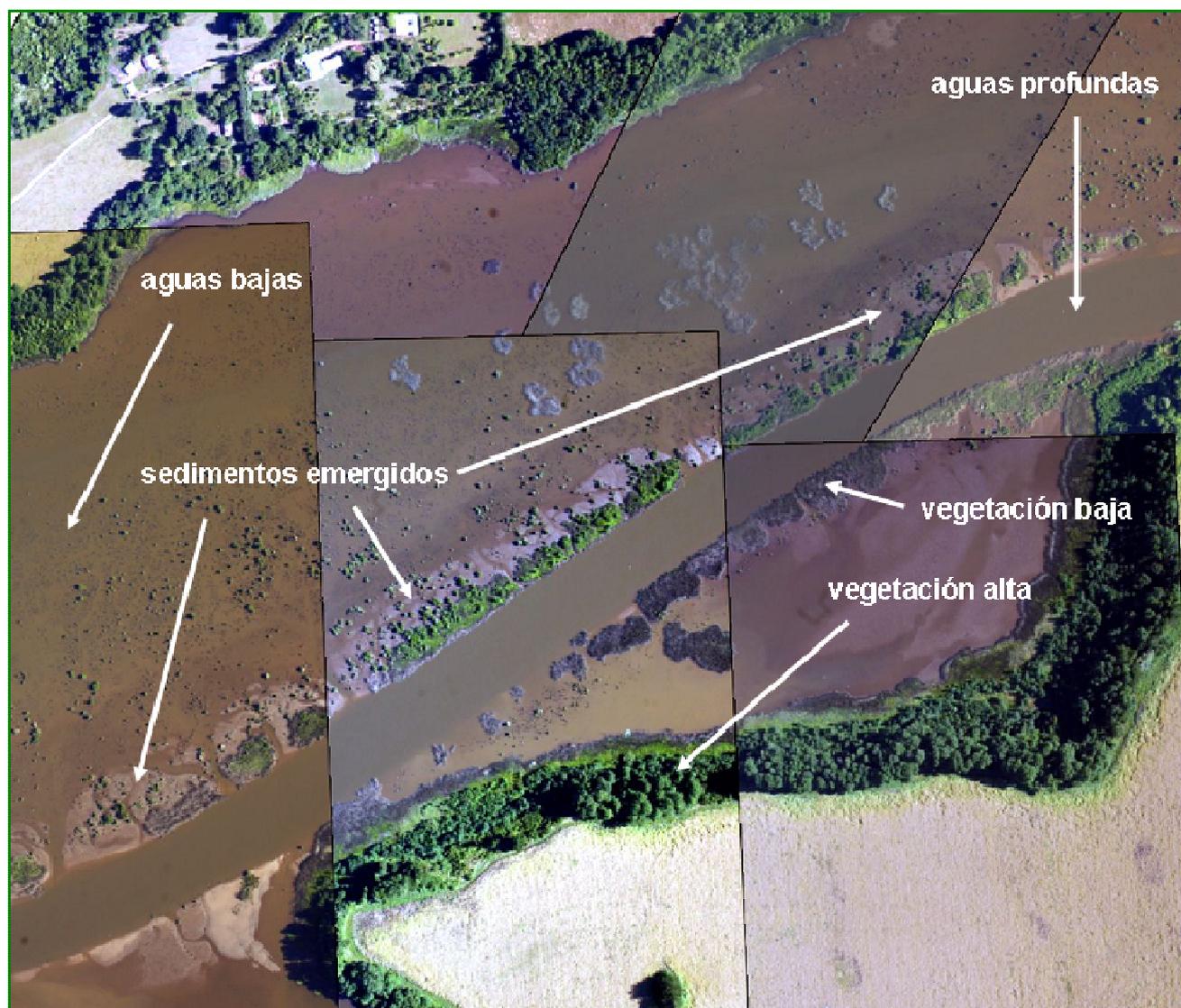
***En relación a exposición de sedimentos de los bañados y desaparición del Luchecillo***

- i) Marín *et al.* (2008 a, b) postulan que los sedimentos de las aguas someras o bañados del humedal quedaron expuestos a bajas temperaturas durante Mayo del año 2004, y que esto, en ausencia de precipitaciones habría resultado en la disminución en biomasa y posterior desaparición del Luchecillo en todo el humedal. Sin embargo, eso no explica la sobrevivencia de plantas ubicadas en áreas sumergidas durante marea baja (e.g. San Martín *et al.* 2000).

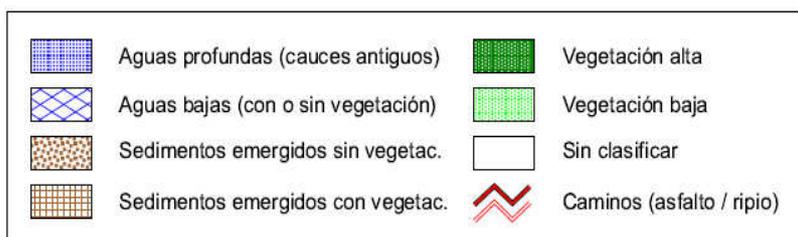
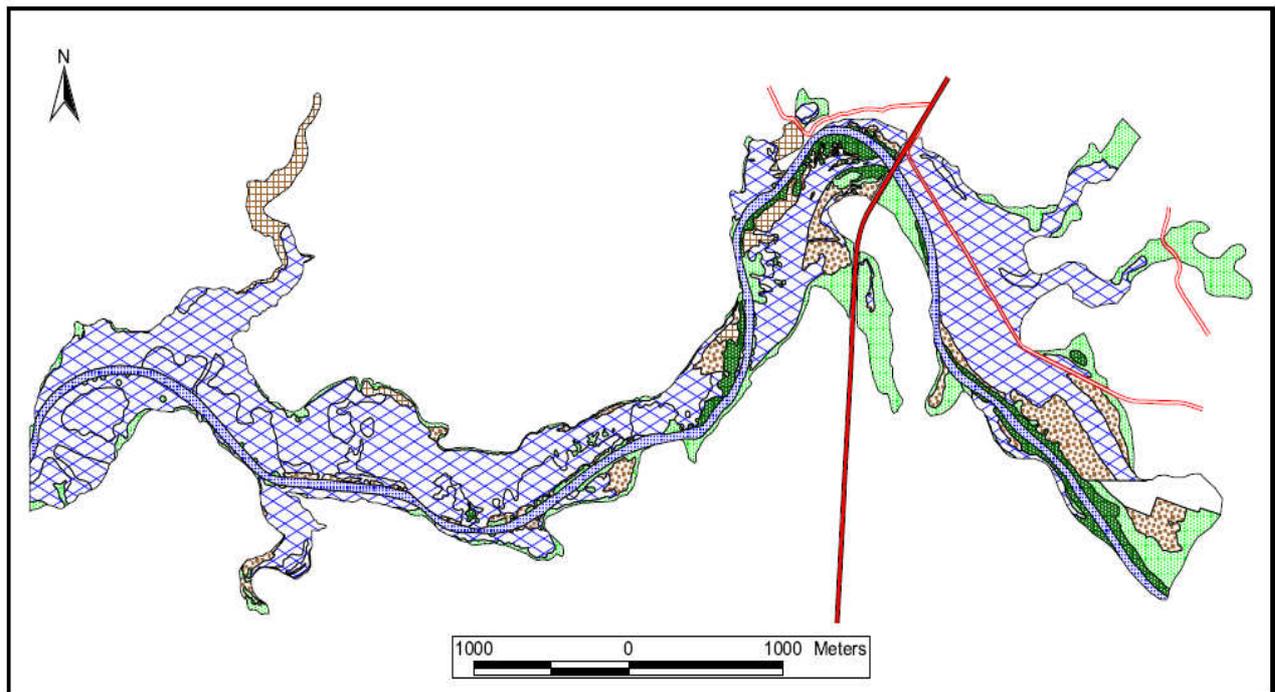
- ii) En relación a la exposición al aire de áreas sedimentarias del humedal, Marín *et al.* (2008 a, b) no consideran que el porcentaje de sedimentos emergidos o que quedan descubiertos durante la marea baja y en época de bajo caudal es mínimo, considerando la superficie de los bañados o aguas bajas que utilizaba *Egeria densa* en el humedal del río Cruces y cauces tributarios antes del año 2004. Esto no es consistente con la mortalidad masiva de esta planta en esas zonas, las cuales no están sometidas a estos cambios y donde aún con esas condiciones ocurre siempre una capa de agua de aproximadamente 20-30 cm. A modo de ilustración, se estimó la superficie de diferentes micro hábitats en el río Pichoy. Para ello se utilizaron fotos áreas verticales obtenidas en todo el humedal el día 20 de Enero del año 2005 (Fig. 8). La selección de esos micro hábitats se basó en el conocimiento de terreno que tienen los autores de este estudio. Estos análisis permitieron categorizar el área del río Pichoy en las categorías que se muestran en las Figuras 9 y 10. Los datos de la Tabla 3, muestran que el micro hábitat sedimentos emergidos sin vegetación (51.60 hectáreas) tiene una representación porcentual aproximadamente 7.5 veces menor que el de aguas bajas o someras (388.70 hectáreas). Es decir, el área que pudo haber quedado expuesta a las bajas temperaturas del aire, tal como lo sostienen Marín *et al.* (2008 a, b) es muy inferior al área que ocupaba *Egeria densa* antes del año 2004. Más aún, el examen de una fotografía aérea tomada el año 2001 en un sector del río Pichoy muestra que el Luchecillo no ocurría en los sedimentos emergidos, sino en áreas de aguas bajas o someras (Fig. 11). Esto permite concluir que antes del año 2004 y aún cuando parte de los mantos de *Egeria densa* hubiesen estado expuestos a temperaturas bajas del aire durante la baja marea, habrían estado siempre apoyados sobre un estrato principalmente constituido por agua, situación que habría atenuado una eventual disminución drástica de la temperatura del aire.



**Figura 8.** Set de fotografías aéreas verticales utilizadas para estimar la superficie de diferentes micro hábitats aledaños al río Pichoy y sus cauces tributarios. El contorno azul señala las orillas del río y la de esos cauces.



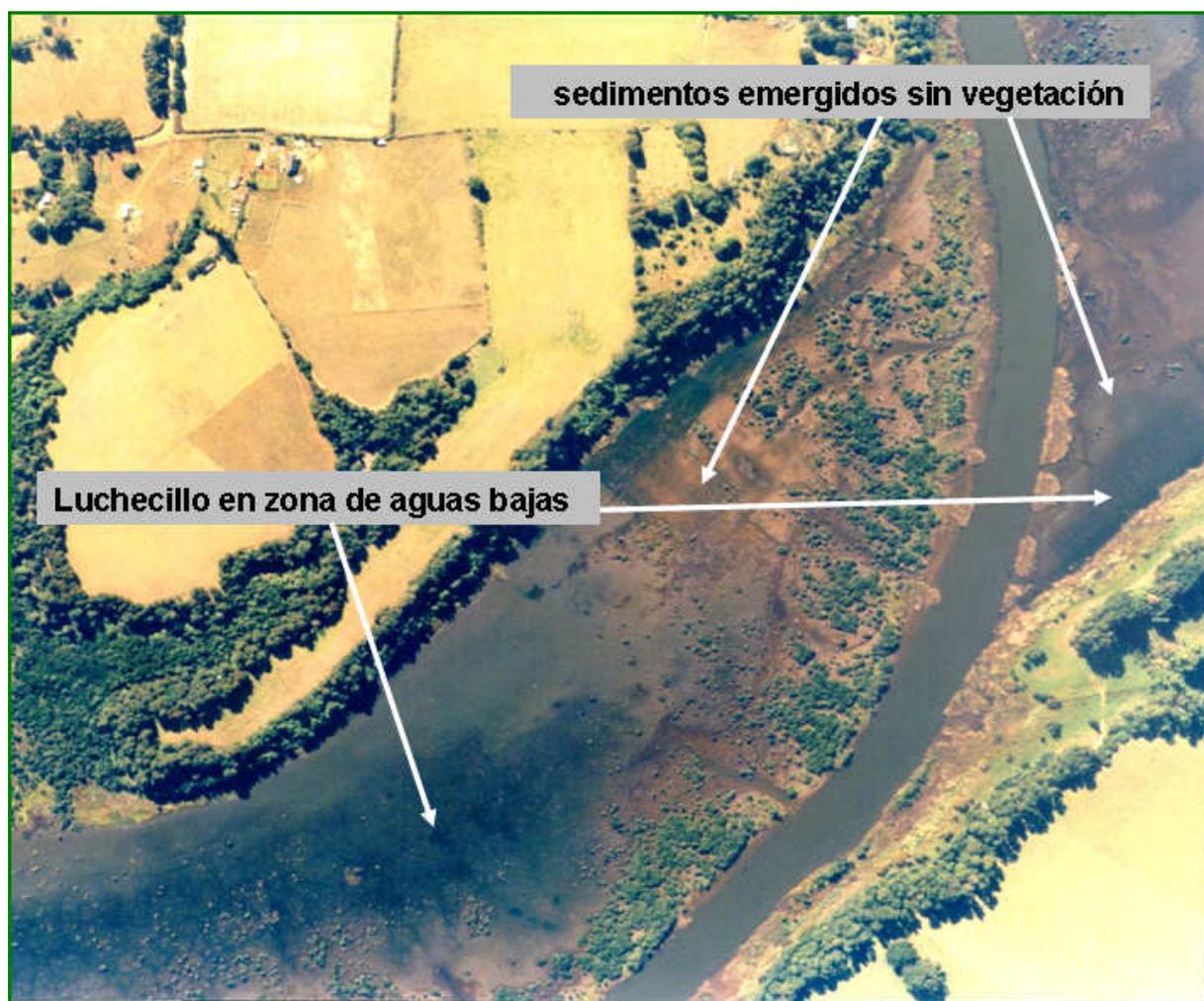
**Figura 9.** Detalle de un sector del río Pichoy seleccionado para mostrar los diferentes micro hábitats en y aledaños al río.



**Figura 10.** Distribución de las diferentes categorías de micro hábitats en y aledaños al río Pichoy.

**Tabla 3.** Superficie en hectáreas y representación porcentual de las diferentes categorías de micro hábitats en y alrededores al río Pichoy.

micro hábitats	hectáreas	porcentaje
aguas profundas (cauces antiguos)	54.20	8.20
aguas bajas (con o sin vegetación)	388.70	58.83
sedimentos emergidos sin vegetación	51.60	7.81
sedimentos emergidos con vegetación	23.40	3.54
vegetación alta	28.60	4.33
vegetación baja	102.00	15.44
áreas sin clasificar	12.20	1.85
total	660.70	100.00



**Figura 11.** Fotografía de un sector del río Pichoy tomada el 29 de Marzo del año 2001 (línea de vuelo 02, foto 01). Se observa que el Luchecillo no ocupaba sedimentos emergidos, sino sólo zonas de aguas bajas o someras.

***En relación a experimentos con Luchecillo (en Anexo 2 del Informe Final de la UCh):***

**i) *Comentarios generales***

Marín *et al.* (2008 b), describen un experimento que considera poner a prueba el efecto de tres factores: temperatura, tiempo de exposición y desecación sobre la tasa fotosintética de *Egeria densa*. Sin embargo, las condiciones experimentales descritas por Marín *et al.* (2008 b) corresponden a un diseño donde el efecto de

cada factor sobre la capacidad fotosintética (medida como producción de O<sub>2</sub>) de *Egeria densa* es evaluada en forma independiente del resto de factores. Es decir, no se consideran las posibles combinaciones de todos estos factores; por lo tanto no se evalúa el efecto interactivo o simultáneo de la temperatura, exposición y desecación. Para someter a prueba la hipótesis postulada por Marín *et al.* (2008 a, b), se requiere cumplir las condiciones de un diseño factorial. Implementar este diseño es crucial, ya que Marín *et al.* (2008 a, b) postulan en forma enfática que el evento que gatilló la mortalidad masiva de *Egeria densa* fue la co-ocurrencia simultánea de factores y no su efecto por separado. Es decir, Marín *et al.* (2008 a, b), establecen en forma explícita (véase puntos 1, 2 y 3 página 31, Marín *et al.* 2008 b), que el evento que gatilló la mortalidad de *Egeria densa* no son aquellas condiciones que someten a prueba experimental. En definitiva, el evidente problema de razonamiento lógico entre el planteamiento de una hipótesis que invoca a la multi-causalidad (co-ocurrencia de factores) y la implementación de un diseño experimental con efectos por separado (uni-causalidad), sugieren que el diseño experimental implementado por Marín *et al.* (2008 b), elude aspectos fundamentales para la prueba de la hipótesis planteada; por lo tanto, sus resultados no tienen el alcance ni la rigurosidad necesaria para ser interpretados en relación a la mortalidad masiva de *Egeria densa* ocurrida durante el año 2004 en el humedal del río Cruces y cauces tributarios.

ii) **Comentarios específicos**

Independiente de los problemas de diseño experimental, los resultados entregados en el Anexo 2 del Informe de Marín *et al.* (2008 b), merecen atención ya que son, a lo menos, contradictorios. Por ejemplo, la exposición a -5 y 5 °C resulta en disminución de la capacidad fotosintética de las plantas (Figura 7 y Tabla 1 del mencionado anexo). Sin embargo, bajo las mismas “condiciones” las plantas expuestas a -2 °C no evidencian una disminución de esta capacidad. Este punto llama la atención y es contra intuitivo, ya que en general el efecto de

la temperatura sobre las variables fisiológicas es lineal; es decir, se debería esperar que también hubiese un efecto a  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es más, los autores concluyen que el rango de temperaturas entre  $-2$  y  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  sería letal (con 6 horas de exposición), lo cual es incorrecto ya que a  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  no se encontraron diferencias significativas. Los resultados muestran que habría una disminución de la tasa de fotosíntesis en las plantas cuando fueron expuestas a temperaturas bajo cero  $^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, llama la atención que el valor de fotosíntesis a cero  $^{\circ}\text{C}$  es mayor que a  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Además, existe una serie de antecedentes críticos que no se informan y que no permiten realizar un acabado análisis de la validez de estos resultados. Por ejemplo, no se evaluó la curva de respuesta a la intensidad lumínica para estas plantas. Tampoco se informa de la época de recolección de dichas plantas. Esto es importante ya que se realizó una “aclimatización” o aclimatación de las plantas previo a la medición, en que se usó  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura adecuada para verano en las zonas tropicales). El tipo de planta de verano o invierno podría diferir notablemente en su respuesta fotosintética, y de esta forma, posiblemente también podría variar la capacidad de las mismas de aclimatarse al frío, lo cual ha sido demostrado en plantas de *Egeria densa* asilvestradas en otros países (Haramoto & Ikusima, 1988). Tampoco se indica si el tipo de agua en que se realizaron los experimentos fue recolectada en el río, reconstituida, o si esa agua fue filtrada del fitoplancton, componente que podría alterar la medición de la fotosíntesis. Tampoco se informa de la concentración de carbono en el agua, ni del pH. Dependiendo de la alcalinidad del agua, la tasa de fotosíntesis podría variar significativamente, como se ha informado ampliamente para esta especie (Kahara & Vermaat, 2003; Lara *et al.* 2002).

Finalmente, las condiciones a las cuales exponen a las plantas son cuestionables en el sentido de que áreas emergidas de los bañados del río Cruces, nunca permanecen expuestas a desecación por más de tres horas aproximadamente, aún cuando el caudal del río sea bajo y la marea también. Por lo tanto, una exposición de cinco días a temperaturas extremas es una situación que se escapa a las condiciones naturales del sistema. Aún considerando eventos de

temperaturas frías, difícilmente todas las plantas habrían desaparecido, ya que parte de la población de *Egeria densa* vivía no solo en los bañados, sino también en el cauce hasta profundidades aproximadas de 2 m (ver por ejemplo Pinochet *et al.* 2004).

## 4. EL PRESENTE ESTUDIO

### 4.1. Fundamentación y objetivos

Varios son las condicionantes para que la hipótesis de la Universidad de Chile sea la adecuada para explicar el origen de los cambios ambientales ocurrentes en el humedal del río Cruces durante el año 2004, entre ellas:

- i) Que eventos similares a los señalados en la Figura 3 del Informe Final (Marín *et al.* 2008 b), no hayan ocurrido con anterioridad a Mayo del año 2004.
- ii) Que la temperatura del agua en el humedal, sea tan baja como la del aire señalado en la misma figura mencionada anteriormente en i.
- iii) Que las temperaturas del aire sobre el humedal y del agua dentro del mismo, sean significativamente más bajas que las ocurrentes en lugares adyacentes al humedal donde el Luchecillo no ha desaparecido.
- iv) Que la altura del espejo de agua dentro del humedal del estuario del río Cruces sea determinado por la variabilidad del caudal del río Cruces.
- v) Que el Luchecillo tenga poca tolerancia a bajas temperaturas del agua.

El objetivo general de este estudio es por lo tanto, revisar los fundamentos lógicos y la evidencia empírica, sobre los cuales debiera estar basada la hipótesis presentada en el Informe Final del estudio “Elaboración de un modelo conceptual del

ecosistema del humedal del río Cruces” (Marín *et al.* 2008 a, b), para explicar los cambios ambientales observados en el humedal del río Cruces durante el año 2004. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- i) Analizar a nivel local la variabilidad espacial de la temperatura mínima del aire durante el invierno de 2008, en sitios ubicados dentro y fuera del humedal del río Cruces.
- ii) Analizar el registro histórico de datos diarios de temperaturas mínimas del aire y precipitaciones, obtenido por el Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile en el Campus Isla Teja y los de caudal del río Cruces obtenidos por la Dirección General de Aguas en su estación hidrológica de Rucaco.
- iii) Analizar la variabilidad de la temperatura del aire y del agua en el humedal del río Cruces y río Calle Calle.
- iv) Analizar las relaciones existentes entre la variabilidad de la altura del espejo de agua en el río Cruces en Rucaco y en el estuario del mismo río (humedal), así como las diferencias de caudales entre ambos y el efecto de la onda mareal sobre la variabilidad de la altura del espejo de agua en el humedal.
- v) Evaluar experimentalmente la tolerancia del Luchecillo (*Egeria densa*) a temperaturas extremas del agua.

## **4.2. Marco teórico**

### **4.2.1. Temperatura del aire, precipitaciones y caudales hídricos**

#### ***Implicancias en ecosistemas de humedales***

Los cambios en los componentes bióticos y abióticos en ecosistemas de humedales, pueden emerger debido a complejos mecanismos de interacción entre procesos ambientales. En general, los cambios en los patrones temporales de las precipitaciones influyen la hidrología de un humedal, alterando la estacionalidad y cantidad en la entrada de agua atmosférica y subterránea, modificando por ejemplo, el nivel del agua, la concentración de solutos, la temperatura y otras variables ambientales que afectan las propiedades bióticas de un humedal (Wilson & Keddy 1986; Gaudet & Keddy 1995; Weither *et al.* 1996; Euliss *et al.* 2004). Además, los caudales hídricos interactúan con las plantas acuáticas, influenciando el arrastre de sedimentos y otras propiedades físico-químicas de la columna de agua como la turbidez (Leonard & Luther 1995; Rose & Crumpton 1996; Oldham & Sturman 2001).

Los componentes bióticos asociadas a los humedales como macrófitas acuáticas (Engelhardt & Ritchie 2001) y ensambles de aves (Jaksic 2004), son sensibles a estos cambios en los componentes abióticos (Wilson & Keddy 1986; Gaudet & Keddy 1995; Weither *et al.* 1996). Esta compleja interacción entre los componentes bióticos y abióticos, determina los estados y trayectorias por la cuales puede pasar un humedal debido a factores naturales (Euliss *et al.* 2004). Sin embargo, debido al aumento de las presiones ejercidas por actividades humanas sobre los ecosistemas de humedales y los servicios ecosistémicos que estos prestan a la sociedad (Constanza *et al.* 1997), la influencia relativa de los procesos bióticos y abióticos sobre los cambios observados en humedales debe ser separada de cambios que tengan su origen en actividades humanas (Carpenter *et al.* 1998). Esta separación es crucial para entender la trayectoria natural de un ecosistema y para implementar estrategias de manejo y restauración, en humedales cuya calidad ha sido degradada por actividades antropogénicas. Separar

estas causas es una tarea mayor que requiere información científica basada en métodos experimentales y de muestreo adecuados (Palma *et al.* 2008), lo cual no siempre está disponible. En tales condiciones, los datos no-experimentales recolectados mediante seguimientos de largo plazo de los sistemas ecológicos, son una herramienta importante para realizar estudios comparativos guiados adecuadamente por hipótesis auxiliares (e.g. Lagos *et al.* 2008 b).

### ***El clima de Valdivia***

La zona circunscrita a Valdivia posee un clima templado lluvioso con influencia mediterránea (Cfb según Köppen en Koepppe & de Long 1958; C=clima templado, f=húmedo, b=mes más cálido inferior a 20 °C). Las precipitaciones fluctúan entre 1.800 y 2.500 mm al año pudiendo tener grandes fluctuaciones interanuales. Las precipitaciones se originan principalmente en sistemas frontales que cruzan la zona (Dirección Meteorológica de Chile). Los extremos anuales registrados durante el último siglo oscilan entre los 1.000 y 3.500 mm (Dirección Meteorológica de Chile) Su distribución espacial está fuertemente influida por la topografía local, especialmente por la Cordillera de la Costa. Se pueden detectar diferencias de más del 20%, a distancias inferiores a 30 Km.

Durante los meses de Mayo a Agosto precipita el 75% anual. Junio y Julio son los meses más lluviosos, alcanzando valores que pueden superar los 400 mm al mes (se han registrado valores superiores a 1000 mm). Los meses más secos son Enero y Febrero con precipitaciones inferiores a 60 mm. Para Valdivia se han registrado eventos máximos diarios que superaron los 150 mm (Huber 1970). Debido a la alta pluviosidad de la zona, la humedad relativa promedio anual es del 80 % (Dirección Meteorológica de Chile). Durante algunos meses de invierno, estos valores superan el 90 % de humedad relativa.

La temperatura promedio anual del aire bordea los 12 °C. La oscilación promedio entre el mes más cálido y el más frío es de aproximadamente 10 °C. Enero y Julio son

los meses más cálidos y fríos respectivamente, con temperaturas promedias cercanas a los 17 y 7 °C, respectivamente (Huber 1970). La temperatura máxima absoluta del aire es cercana a 35 °C y la mínima a -4°C. Las heladas que se registran en la zona son de origen radiativo, por consiguiente se producen principalmente durante noches despejadas.

#### 4.2.2. Hidrodinámica

En los cauces fluviales de cualquier escala existe una relación lineal, directa y significativa entre la altura del agua y el caudal del río. Una vez medida varias veces la altura del agua y calculado el caudal mediante técnicas de aforo, se puede calcular la ecuación correspondiente. Para el sector Rucaco del río Cruces, esta es: caudal ( $m^3s^{-1}$ ) = altura del agua (cm) x 0.96745 – 82.119.

La palabra estuario deriva del latín *aestus*, que significa “de marea”, tal como lo describe Maccius Plautus<sup>1</sup> “*aestus maris accedere et reciprocare maxime mirum, pluribus quidem modis, sed causa in sole lunâque*, Plin. 2, 97, 99”. Se reconoce así y desde hace siglos, que la energía mareal es la forzante principal, tanto de los caudales instantáneos al interior de un estuario como de la altura del agua, lo que es debido a la interacción con la batimetría somera del estuario. Por otra parte, el límite superior de un estuario es aquel hasta donde la onda mareal tiene influencia, independientemente de que ocurra intrusión salina o no.

En los estuarios (como es el caso del humedal del río Cruces) no se pueden establecer ecuaciones para relacionar altura del agua y caudal, pues se pueden dar casos en que la altura sea la máxima y el caudal igual a 0, o que para una altura dada, por la mitad superior de la columna de agua el caudal se dirija hacia la boca o desembocadura (el mar) y por la mitad inferior de la misma, la corriente este dirigida hacia la cabecera (la cuenca fluvial). Un ejemplo local ha sido analizado por Pino *et al.*

---

<sup>1</sup> T. Maccius Plautus. Plauti Comoediae. F. Leo. Berlin. Weidmann. 1895. OCLC: 38932877

(1994) a vez que ejemplos para estuarios sudamericanos han sido publicados por Perillo *et al.* (1999).

La marea en el sistema estuarial valdiviano es del tipo micromareal semidiurno, es decir con rangos mareales que no superan los 2 m y alturas máximas y mínimas extremas durante la noche en los períodos de sicigia (luna llena y luna nueva). Los estuarios de los ríos Calle Calle, Valdivia, Cruces, Futa y Tornagaleones, son del tipo mezcla parcial, es decir con estratificación de temperatura y salinidad vertical y horizontal, debido a que la energía mareal es de varios ordenes de magnitud superior a la energía cinética fluvial. Cuando los aportes fluviales invernales superiores a la media coinciden con las altas mareas de sicigia, ocurre un efecto sinérgico que origina inundaciones en la parte media de los estuarios, por ejemplo, en la ciudad de Valdivia (Rojas 2002, 2005; Rojas & Mardones 2003). Cuando los caudales fluviales tienen energía superior a la mareal, la circulación del estuario es en forma de cuña, con dos capas bien delimitadas. En este caso, comúnmente ocurre un delta fuera de la boca, tal como en el sistema estuarial del río Mississippi con caudales de hasta  $20.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , o en el estuario externo del río Amazonas, con caudales de hasta  $200.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Bajo régimen normal de precipitaciones, la cuenca fluvial del río Cruces en Rucaco origina caudales máximos del orden de  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  mientras que la cuenca del río Calle Calle aporta flujos de agua máximos del orden de  $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Excepcionalmente y por corto tiempo la cuenca del río Cruces puede producir hasta  $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

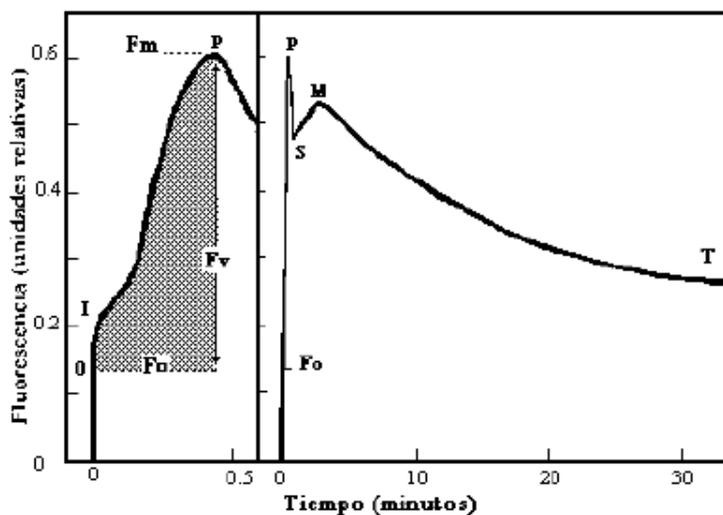
Los actuales estuarios valdivianos se crearon por subsidencia cosísmica (1 a 2 m de hundimiento) el 22 de mayo de 1960 (Saint Amand 1963; Plafker & Savage 1970; Cifuentes 1989; Barrientos & Ward 1990; Pino 1995), inundándose toda la superficie de la terraza que se había originado durante el óptimo climático del Holoceno, hace unos 7000 años atrás. Estas zonas de aguas someras, hoy denominadas coloquialmente “bañados” (por ejemplo, en el estuario o humedal del río Cruces), permanecen la mayor parte del tiempo bajo el agua por la coincidencia de orden de magnitud entre el rango mareal y el hundimiento cosísmico.

### 4.2.3. Fotosíntesis y cambios en condiciones de vida de las plantas

La fotosíntesis es uno de los procesos fisiológicos más sensibles a cualquier cambio en las condiciones de vida de las plantas. La luz absorbida por las moléculas de clorofila, puede ser ocupada en tres procesos competitivos entre sí: fotosíntesis (fotoquímica), disipación de calor y re-emisión como fluorescencia. Por lo tanto, cualquier aumento en la eficiencia de uno de los procesos deriva en la disminución del rendimiento de los otros dos (Krause & Weis 1991; Maxwell & Johnson 2000; Zúñiga *et al.* 2006). Debido a lo anterior, la medición de la producción de fluorescencia entrega información importante acerca de la eficiencia fotoquímica de la planta. La foto inhibición de la fotosíntesis se relaciona con una disminución del coeficiente de fluorescencia variable/fluorescencia máxima ( $F_v/F_m$ ), el cual es utilizado como un indicador sensible del desempeño fotosintético vegetal (An & Shangguan 2008) y de estrés fisiológico en plantas (Larcher 2003; Mohammed *et al.* 1995).

En condiciones normales, las plantas superiores poseen un  $F_v/F_m$  cercano a 0.83 y que oscila aproximadamente entre 0.70 y 0.85 (Maxwell & Johnson 2000; Rizza *et al.* 2001). La disminución de este coeficiente ha sido relacionada con la caída del rendimiento óptimo de la fotosíntesis (Krause & Weis 1991). A medida que los valores de  $F_v/F_m$  se acercan cada vez más a cero, es porque existe una completa inactivación del fotosistema II, es decir el centro donde se agrupan pigmentos fotosintéticos (clorofila, entre otros) capaces de captar la energía luminosa procedente del sol para transformarla en energía química, lo que constituye la primera etapa en el proceso de la fotosíntesis (Rapacz 2007).

La emisión de fluorescencia presenta una curva característica, denominada curva o efecto Kautsky (Kautsky & Hirsch 1931) (Figura 12), la cual grafica los cambios de intensidad de la fluorescencia durante la transición oscuridad/luz mediante la activación de los procesos fotosintéticos.



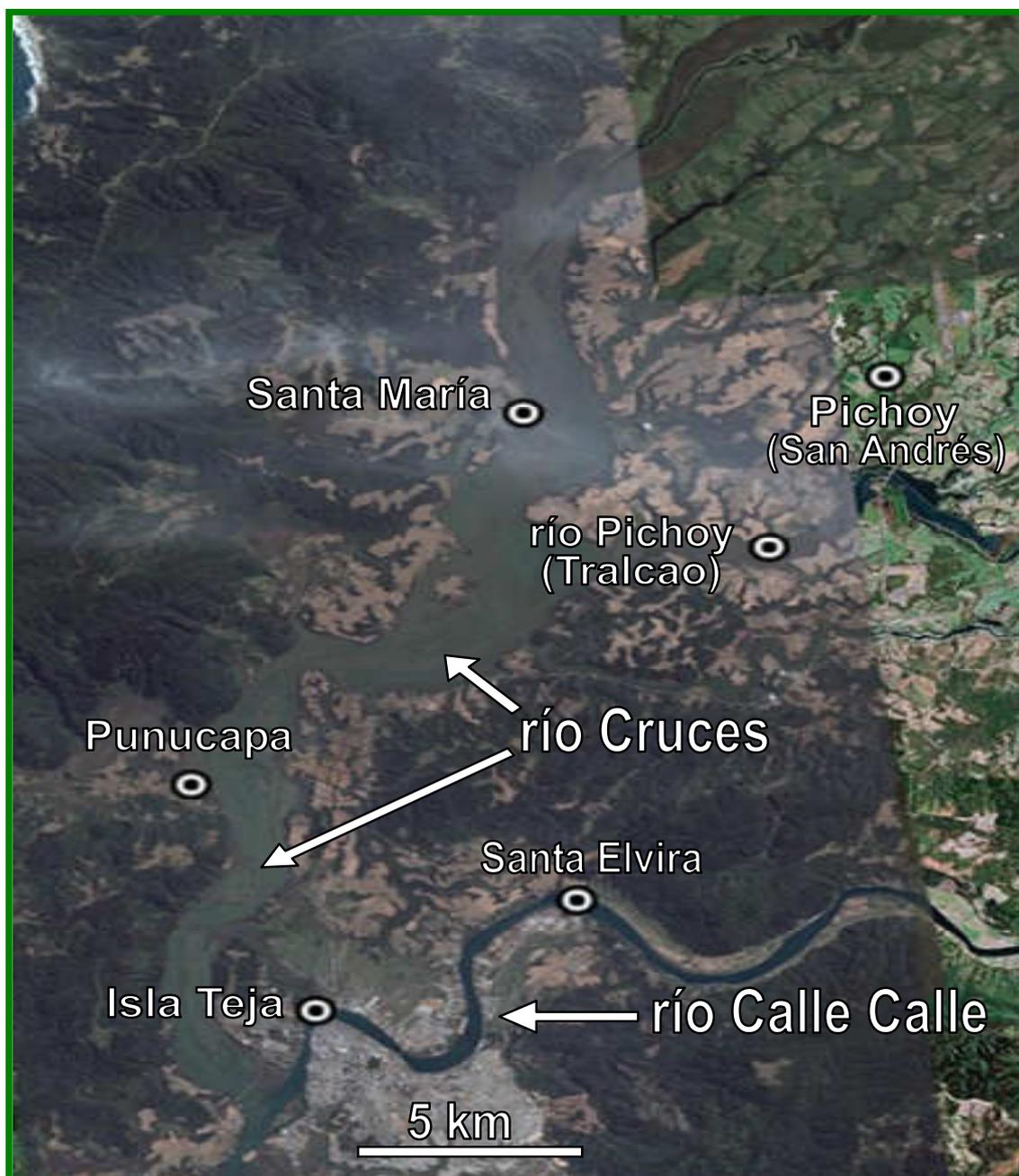
**Figura 12.** Efecto Kautsky. Curvas de emisión de fluorescencia de hojas previamente adaptadas a la oscuridad. Al momento de la iluminación, la fluorescencia aumenta casi instantáneamente hasta un nivel inicial ( $F_o$ ) luego aumenta rápidamente hasta un nivel máximo ( $F_m$ ). Finalmente la emisión de fluorescencia disminuye lentamente hasta un estado estacionario (T), después de haber pasado por un segundo máximo (M). (Figura tomada de Rojas, 2007).

## 5. MATERIAL Y METODOS

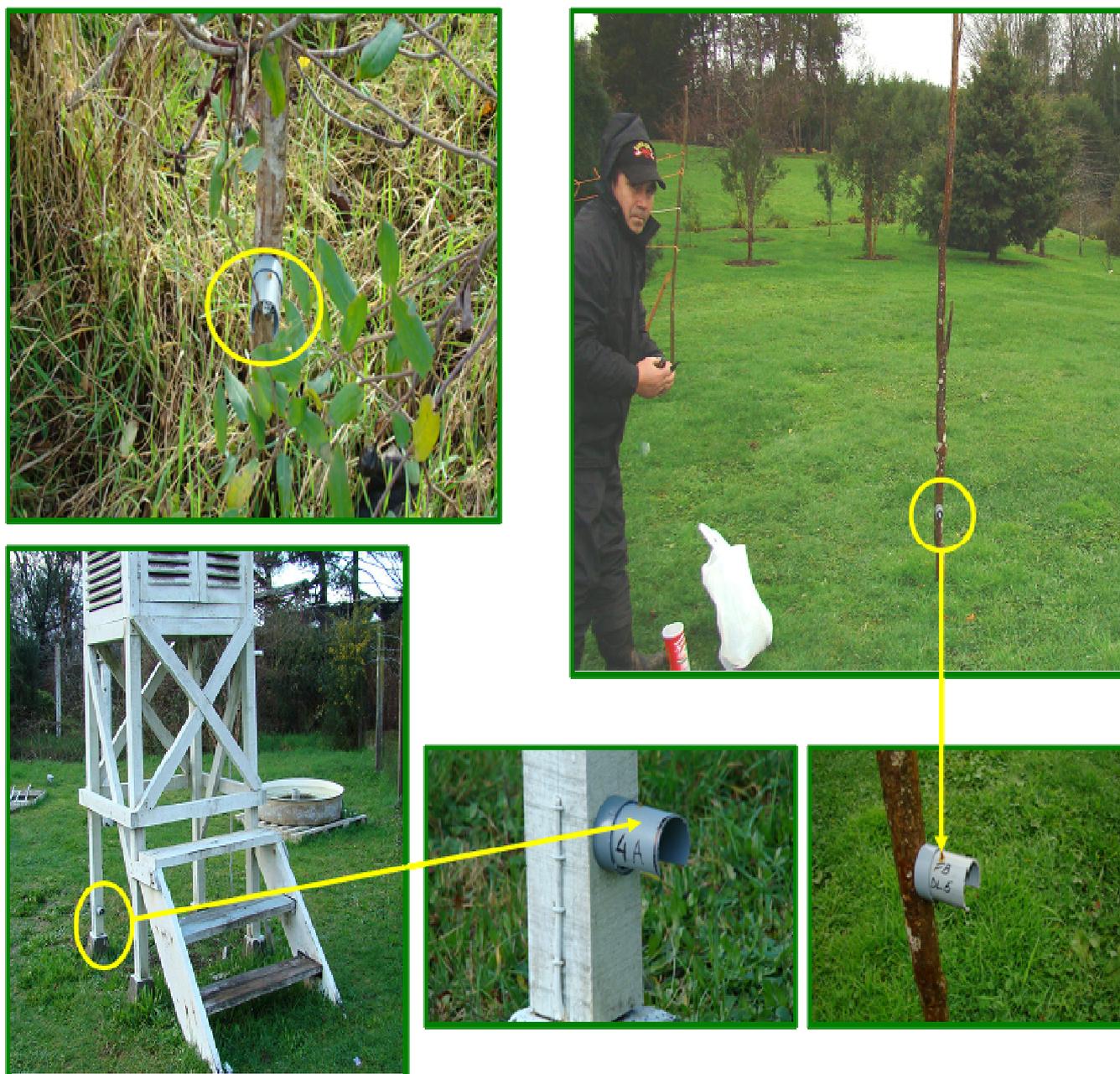
### 5.1. En relación a objetivo específico i: análisis de la temperatura del aire durante el invierno del año 2008 en el humedal del río Cruces y río Calle Calle

Se instalaron sensores tipo i-button para medir la temperatura del aire en las riberas de los ríos Cruces (sectores Santa María y Punucapa), Pichoy (sector Tralcao) y Calle Calle (sector Santa Elvira) (Fig. 13). También se instalaron sensores en dos áreas alejadas de riberas acuáticas: una en el sector de Pichoy (Fundo San Andrés) y otra en el Campus Isla Teja de la UACH (estación meteorológica del Instituto de Geociencias) (Fig. 13). Los sensores se cubrieron con segmentos de PVC adosados a varas de madera o troncos de árboles a una altura aproximada de 25 cm sobre el nivel del suelo

(ver Figura 14). Los sensores fueron programados para obtener datos de temperatura cada cinco minutos; entre el 4 y el 9 de Julio del año 2008.



**Figura 13.** Ubicación de los sectores donde se instalaron sensores para mediciones de temperatura del aire durante Julio del año 2008. En los sectores Santa María (río Cruces), Tralcao (río Pichoy), Punucapa (río Cruces) y Santa Elvira (río Calle Calle), también se instalaron sensores para mediciones de temperatura del agua (ver 5.3).



**Figura 14.** Disposición de sensores (círculos y elipses amarillos) para mediciones de temperatura del aire. Nótese que lo que se observa son los protectores plásticos de los mismos.

## 5.2. En relación a objetivo específico ii: análisis de registros históricos diarios de temperatura mínima del aire y precipitaciones en Valdivia y caudal del río Cruces en Rucaco

Se analizó el registro histórico de la temperatura del aire (°C) y pluviometría (mm) que se obtiene diariamente en la estación meteorológica del Instituto de Geociencias, ubicada en el Campus Isla Teja de la Universidad Austral de Chile en Valdivia desde 1960 hasta Diciembre del año 2007. Los datos que se analizan son las temperaturas mínimas del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo, ya que son estas las que mejor representan la distribución temporal de los diferentes eventos de heladas en el área de Valdivia. Para el periodo 1969 a Diciembre del año 2007 se analizaron los datos diarios de caudal del río Cruces obtenidos en la estación hidrológica que la Dirección General de Aguas (DGA) tiene localizada en Rucaco.

Se realizó un completo análisis de estadística descriptiva para resumir las fluctuaciones temporales de cada variable. Se usó la prueba de *t*-Student de una cola, para evaluar la existencia de diferencias significativas entre los estadígrafos históricos y el correspondiente estadígrafo estimado para el año 2004. Además, se representó el histograma para cada variable, con el objetivo de explorar la frecuencia a la que ocurren los eventos de una determinada magnitud de cada variable.

Con los datos históricos, se construyeron tres matrices conteniendo los datos temporales para cada variable ambiental  $[i_{\text{día}} \times j_{\text{año}}]$ . Cada matriz fue sometida a una re-clasificación binaria, asignándole el valor de 1 a cada día en que se cumplían las condiciones propuestas por Marin *et al.* (2008 a, b) para cada variable ambiental. De esta forma se construyó la matriz binaria  $T_{(<0^{\circ}\text{C})} = [i_{\text{día}} \times j_{\text{año}}]$ , que representa a los días en que la temperatura (T) sobre el suelo registró valores bajo (1) y sobre (0) cero °C. Para el caso de las precipitaciones (PP), se construyó la matriz binaria  $PP_{(0)} = [i_{\text{día}} \times j_{\text{año}}]$ , cuyas celdas toman el valor 1 o 0 dependiendo si no hubo (0 mm) o hubo (> 0 mm) precipitación. Para el caudal, la matriz se re-clasificó estableciéndose un criterio de corte para definir un caudal como “bajo” o “no-bajo”. Dado que este criterio no es definido explícitamente por Marin *et al.* (2008 a, b), se decidió en principio que valores inferiores

al primer cuartil (Q1) de la distribución de frecuencias del caudal es un criterio apropiado para definir un caudal bajo. Este criterio es bastante austero, considerando que al menos el 25% de las observaciones diarias de caudal registrados desde 1969 hasta Diciembre del año 2007, serían consideradas como “bajos”. El análisis de la estadística descriptiva indicó que el primer cuartil tiene el valor de 20 m<sup>3</sup>/s para todo el periodo de estudio. Usando este criterio se realizó la clasificación binaria, asignado un 1 o 0 para cada día en que el caudal (C) fue menor-igual o mayor a 20 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, construyéndose la matriz binaria  $C_{(<20)} = [i_{\text{día}} \times j_{\text{año}}]$ .

Cada matriz fue sometida a análisis descriptivo con el objetivo de caracterizar la ocurrencia de eventos fríos, de bajas precipitaciones y de bajo caudal. Esto se realizó sumando los días en que ocurría cada evento a través de los meses de cada año para todo el periodo de estudio. La co-ocurrencia de los eventos propuestos por Marín *et al.* (2008 a, b), como gatilladores del evento inicial de mortalidad de *Egeria densa* en el humedal del río Cruces fueron evaluados multiplicando las celdas  $i,j$  entre las tres matrices binarias; entonces:

$$\text{Hipótesis de Marín (HM) } et al. (2008 a, b) = [HM(2008)_{i,j}] = T_{(<0^{\circ}C)_{i,j}} * PP_{(0)_{i,j}} * C_{(<20)_{i,j}} \quad (1)$$

La matriz HM contiene los días en que co-ocurrieron las tres condiciones postuladas (celda  $i,j$  toma el valor 1), mientras que los días en que no se cumplen las tres condiciones la celda toma el valor cero. Sumando los días con valores de 1 a través de los meses de cada año para todo el periodo de estudio, se caracterizó el número de días en que se cumple la co-ocurrencia de eventos fríos, bajas precipitaciones y de bajo caudal. Para evaluar el rol de la persistencia de estos eventos, se cuantificó el número de ellos que duraron al menos, dos días consecutivos. Para esto, las celdas  $i,j$  de cada matriz binaria se multiplicaron entre días consecutivos (Con):

$$TCon_{(<0^{\circ}C)_{i,j}} = T_{(<0^{\circ}C)_{i,j}} * T_{(<0^{\circ}C)_{i+1,j}} \quad (2)$$

$$PPCon_{(0)_{i,j}} = PP_{(0)_{i-n-1}} * PP_{(0)_{i+1,j}} \quad (3)$$

$$CCon_{(<20)_{i,j}} = C_{(<20)_{i,j}} * C_{(<20)_{i+1,j}} \quad (4)$$

Las nuevas matrices se sometieron a análisis descriptivos para cuantificar la ocurrencia de eventos consecutivos y sus celdas  $i,j$  se multiplicaron para evaluar la co-ocurrencia de eventos consecutivos, generando una nueva matriz para la Hipótesis de Marín (HM) *et al.* (2008 a,b),  $[H2M(2008)_{i,j}]$ .

$$[H2M(2008)_{i,j}] = TCon_{(<0^{\circ}C)_{i,j}} * PPCon_{(0)_{i,j}} * CCon_{(<20)_{i,j}} \quad (5)$$

### 5.3. En relación a objetivo específico iii: análisis de la variabilidad de la temperatura del aire y del agua en el humedal del río Cruces y río Calle Calle

El Jueves 4 de Julio se instalaron sensores tipo TBI32 -05+37 para la medición de temperatura del agua en las riberas de los ríos Cruces (sectores Santa María y Punucapa), Pichoy (sector Tralcao) y Calle Calle (sector Santa Elvira) (Fig. 13). Los sensores se fijaron dentro de cápsulas de protección constituidas por segmentos de PVC atados con cuerdas nylon a una vara enterrada en el fondo sedimentario de cada sector (Figura 15). Los datos se compararon con aquellos de temperaturas del aire recolectados en los mismos sectores (ver punto 5.1).



**Figura 15.** Cápsulas plásticas conteniendo sensores para mediciones de temperatura del agua.

#### 5.4. En relación a objetivo específico iv: análisis de caudales y variabilidad mareal en el humedal del río Cruces

Para cumplir este objetivo se analizaron los datos (flujos residuales) obtenidos durante la marea de sicigia nocturna del 13 al 14 de Enero del año 2006 en el estuario del río Cruces, sector Tres Bocas (Fig. 16). Se empleó correntometría euleriana y la metodología propuesta por Perillo & Picollo (1991) la que ha sido explicada en detalle en Pino *et al.* (1994), donde se incluyen mediciones de batimetría y mareas.



**Figura 16.** Ubicación del sector Tres Bocas, estuario del río Cruces.

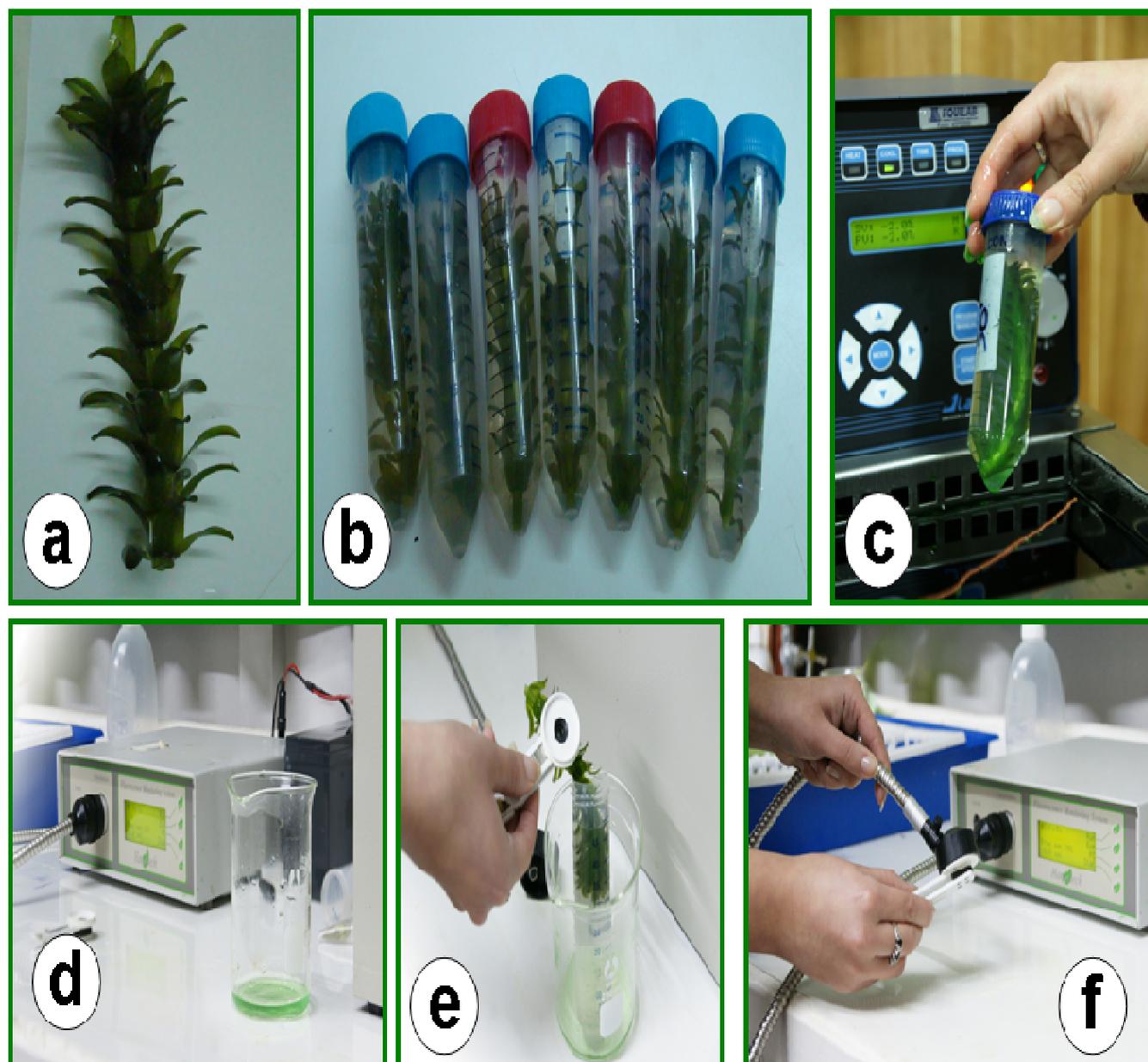
### **5.5. En relación a objetivo específico v: tolerancia del Luchecillo a temperaturas extremas del agua**

Para los dos tipos de experimentos realizados entre el 10 y 24 de Julio de 2008 se recolectaron plantas de Luchecillo de la ribera sur del río Calle Calle (costanera frente a terminal de buses de Valdivia). Estas se mantuvieron en agua del río Calle Calle y temperatura ambiente de aproximadamente 15 °C hasta su uso en los protocolos experimentales. La temperatura del río en el momento de la recolección varió entre 10 y 11 °C, aproximadamente.

#### ***Experimento 1: tolerancia del Luchecillo a temperaturas extremas***

Se prepararon segmentos de plantas de aproximadamente 10 cm de longitud (Fig. 17 a), los que fueron introducidos en tubos Falcon de 50 ml con agua del río (Fig. 17 b). Los tubos se colocaron en un baño termostático circulante de agua "Model LCP-R108" (Daihan Labtech Co., Ltd.; precisión=  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , rango de temperatura=  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ ) (Fig. 17 c) con agua destilada a las siguientes temperaturas: 2, 8, 20, 28 y  $38^{\circ}\text{C}$ . Se evaluó también una temperatura de  $-2^{\circ}\text{C}$ , para lo cual se introdujo líquido anticongelante de uso comercial (911-VersaChem) en el recipiente de líquido del baño termostático. Para cada temperatura experimental se utilizaron 7 tubos Falcon. Después de 0.5, 1, 2 y 4 horas de iniciados los experimentos, se retiraron los tubos experimentales del baño termostático para realizar mediciones de fluorescencia en hojas de las plantas con un fluorímetro Fluorescence Monitoring System – Hansatech (Fig. 17 d). Esta técnica consiste en inducir la emisión de fluorescencia de la clorofila *a* en plantas adaptadas a la oscuridad y posteriormente iluminadas. Para realizar esas mediciones se oscurecieron las hojas con una pinza especial durante 30 minutos (Fig. 17 e y 17 f), con el fin que los centros de reacción (constituidos por la clorofila encargada de transferir electrones a un aceptor adyacente) se encontrasen oxidados o abiertos (sin electrones). Luego se aplicaron pulsos de luz saturante (aproximadamente  $8000 \mu\text{mols}^{-1}\text{m}^{-2}$ ) para obtener el parámetro  $F_v/F_m$ , donde  $F_v$  = Fluorescencia variable ( $F_0 - F_m$ ) y  $F_m$  = fluorescencia máxima luego de aplicar una intensidad saturante de luz.

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*



**Figura 17.** a) plantula de Luchecillo utilizada como unidad de estudio, b) plántulas de Luchecillo en tubos Falcon con agua del río Calle Calle, c) vista de un tubo Falcon siendo introducido en baño termostático de agua, d) vista del fluorímetro utilizado, e) introducción de parte de una plántula en pinza del fluorímetro, f) disposición de pinza para medición de fluorescencia.

### ***Experimento 2: tolerancia y recuperación del Luchecillo a temperaturas extremas***

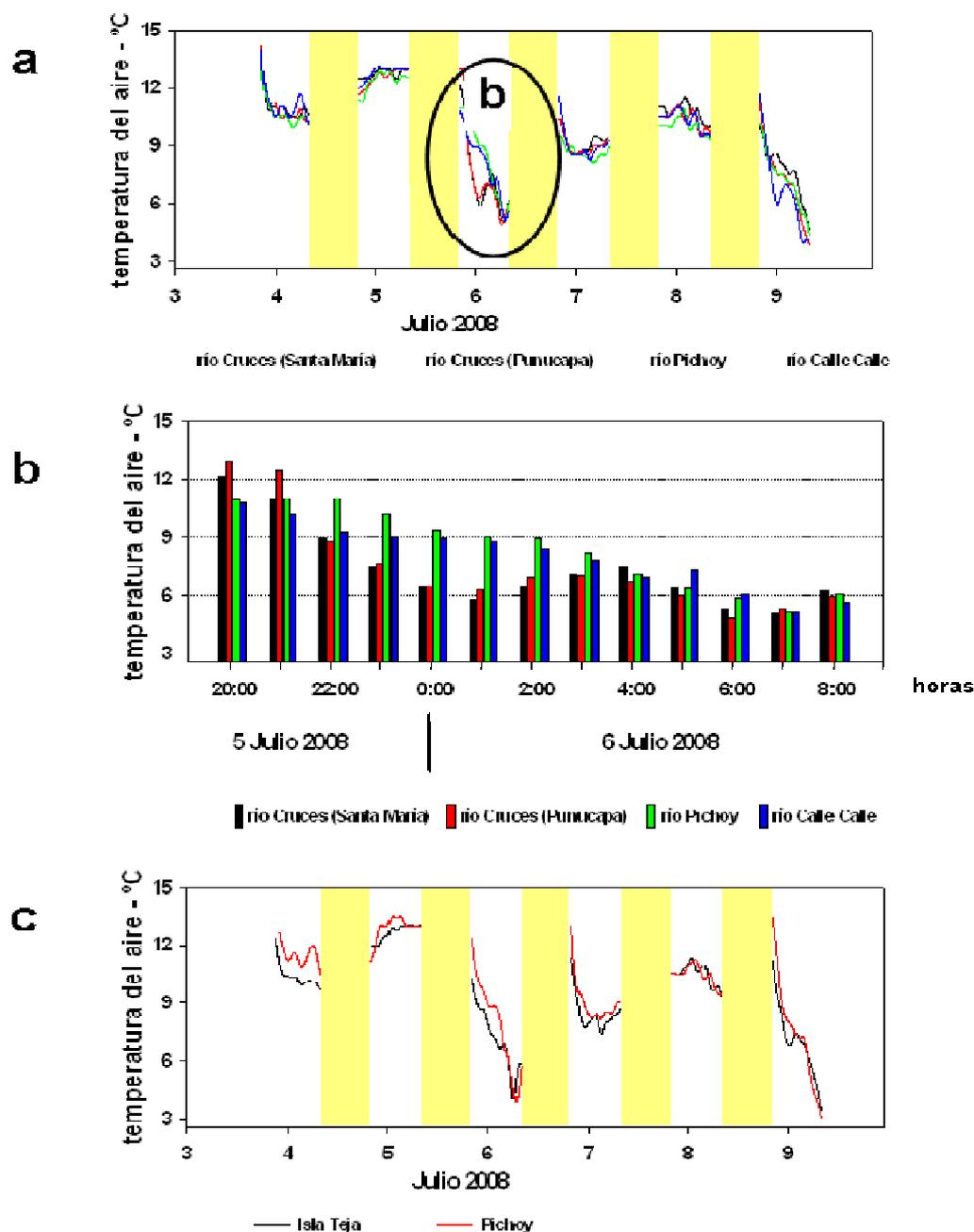
Se prepararon segmentos de plantas de aproximadamente 10 cm de longitud, los que fueron introducidos en tubos Falcon de 50 ml que fueron luego sometidos a tres condiciones experimentales: i) 20 °C en cámara de mantención, ii) 4 °C en el compartimento inferior de un refrigerador Whirlpool 350 T y iii) -15 °C en el compartimento superior o freezer del mismo refrigerador. Para cada una de estas condiciones se prepararon 18 tubos Falcon (nueve con agua de río y nueve sin agua de río), los que fueron sometidos a dos y cuatro horas de exposición a cada condición. Después de 0.5, 4, 8, 24 y 72 horas de iniciados los experimentos para la primera exposición (dos horas) y de 2, 18, 27, 44 y 56 horas para la segunda exposición (cuatro horas), se retiraron los tubos experimentales para realizar mediciones de fluorescencia en hojas de las plantas experimentales, tal como explicado más arriba. Los tubos y sus plantas se mantuvieron en la cámara de mantención a 20 °C, entre cada uno de los tiempos de medición.

## **6. RESULTADOS**

### **6.1. Temperatura del aire durante el invierno del año 2008 en el humedal del río Cruces y río Calle Calle**

La Figura 18 a muestra la variabilidad de la temperatura del aire a 25 cm sobre el nivel del suelo en las riberas de los ríos Cruces, Pichoy y Calle Calle. En general, las temperaturas más bajas del aire (hasta aproximadamente 4 y 5 °C) ocurrieron al amanecer (entre las 6:00 y las 8:00 AM) (Fig. 18 a). La Figura 18 b muestra una amplia variabilidad espacial de la temperatura dentro del humedal durante algunas horas: por ejemplo, entre la medianoche y las 2:00 AM, hubo diferencias de hasta aproximadamente 3 °C entre los sectores de Santa María (río Cruces) y Tralcao (río Pichoy). La Figura 18 c muestra que en Isla Teja y Pichoy (Fundo San Andrés), los

sitios de medición más alejados de las riberas acuáticas, alcanzaron valores de temperaturas similares, especialmente en las horas más frías.



**Figura 18.** Variabilidad diaria de la temperatura del aire medida cada 5 minutos en las riberas de los ríos Cruces, Pichoy y Calle Calle y en áreas alejadas de esas riberas (estación meteorológica del Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja y sector Pichoy (Fundo San Andrés)). Los valores graficados corresponden al promedio horario de las mediciones realizadas cada cinco minutos entre las 20:00 PM y las 8:00 AM.

## 6.2. Variabilidad histórica de la temperatura mínima del aire y precipitaciones en Valdivia y caudal del río Cruces en Rucaco

Los datos muestran que sin excepción, desde 1960 hasta el año 2007, en el área de Valdivia siempre se han registrado temperaturas mínimas del aire (5 cm sobre el nivel del suelo) menores a 0 °C, con extremas anuales que han variado entre -3.5 hasta -9.1 °C (Tabla 4). El 25% de las observaciones anuales (cuartil 1, Q1) de temperatura está por bajo 3.0 °C. El promedio anual de precipitaciones fluctúa entre 3.8 y 8.6 mm de agua caída; sin embargo, para todos los años el Q1 de las precipitaciones toma el valor mínimo (Tabla 4), lo cual implica que al menos el 25% de los días no llueve en el área de Valdivia. En el caso del caudal del río Cruces, el promedio anual fluctúa entre 33.5 y 174.3 m<sup>3</sup>/s; el Q1 indica que al menos el 25% de los días del año el caudal fluctúa entre 9.1 y 60.2 m<sup>3</sup>/s (Tabla 4).

La media de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo fue significativamente mayor el año 2004 respecto a la media histórica (Tabla 5). Lo mismo puede concluirse respecto al Q1 y temperaturas mínimas, ya que en ambos casos los valores registrados durante el año 2004 fueron significativamente mayores a los estadígrafos históricos. No se registraron diferencias significativas entre la temperatura máxima del año 2004 y el valor histórico (Tabla 5). Por lo tanto, en términos anuales el año 2004 no fue un año extremadamente frío. Resultados y tendencias similares en la dirección de las diferencias se registraron en la variable precipitaciones: el valor promedio y máximo observado el año 2004 fue significativamente mayor que lo registrado históricamente (Tabla 5). En este caso puede concluirse que el año 2004 fue un año relativamente lluvioso. Finalmente, en relación al caudal es posible concluir que su valor promedio fue significativamente menor durante el año 2004 en relación al promedio histórico; no se detectaron diferencias significativas en la posición del Q1, con un caudal mínimo significativamente más bajo que el promedio de la mínima histórica pero con eventos de caudales máximos significativamente más altos que lo registrado históricamente. Se concluye entonces que el caudal del año 2004 fue más bajo que el

caudal histórico (Tabla 5), conclusión similar a la registrada ya por Lagos *et al.* (2008 a) en un análisis que incluye datos similares para el periodo entre el año 1999 y 2006.

**Tabla 4.** Resumen de estadística descriptiva de las fluctuaciones anuales en temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo y precipitaciones medidas en el Campus Isla Teja de la Universidad Austral de Chile y caudal del río Cruces en Rucaco. Prom. = Promedio, De = Desviación estándar, Q1 = Cuartil 1; min. = mínimo; max. = máximo.

años	temperatura (°C)					precipitaciones (mm)					caudal (m <sup>3</sup> /s)				
	Prom.	De	Q1	min.	max.	Prom.	De	Q1	min.	max.	Prom.	De	Q1	min.	max.
1960	4.8	4.2	1.8	-5.6	15.9	5.4	13.7	0	0	137	.	.	.	.	.
1961	4.8	4.0	1.8	-6.8	14.0	7.4	15.8	0	0	131	.	.	.	.	.
1962	5.0	4.4	2.0	-6.5	15.4	4.8	11.1	0	0	78	.	.	.	.	.
1963	5.1	4.2	2.0	-6.4	13.9	6.9	12.1	0	0	76	.	.	.	.	.
1964	4.5	4.2	1.2	-6.3	13.6	5.4	10.7	0	0	84	.	.	.	.	.
1965	4.9	4.4	1.4	-6.0	16.0	7.4	13.7	0	0	71	.	.	.	.	.
1966	5.3	4.1	2.0	-4.1	14.5	6.8	13.4	0	0	101	.	.	.	.	.
1967	4.9	4.3	1.9	-7.3	16.7	7.2	15.5	0	0	119	.	.	.	.	.
1968	5.0	4.2	1.9	-3.5	16.4	5.8	12.1	0	0	94	.	.	.	.	.
1969	5.0	4.0	2.1	-6.2	13.5	8.0	17.5	0	0	117	174.3	158.2	60.2	27.6	856
1970	5.2	4.1	2.5	-4.6	15.2	6.2	10.7	0	0	58	98.0	110.3	22.9	15.6	612
1971	4.4	4.2	1.2	-5.3	14.3	7.0	14.3	0	0	80	114.4	138.8	28.7	8.0	879
1972	5.2	4.5	1.9	-5.5	17.0	6.2	13.4	0	0	122	108.4	102.8	16.0	12.2	481
1973	4.3	4.5	1.2	-9.1	14.9	5.6	11.3	0	0	85	88.3	101.6	19.7	14.4	841
1974	4.1	4.4	0.6	-6.7	14.3	5.2	10.9	0	0	78	73.1	69.3	21.5	8.0	377
1975	4.6	4.5	1.2	-6.0	14.4	6.8	12.5	0	0	78	86.1	83.0	17.3	9.2	467
1976	4.5	4.4	1.0	-6.4	14.2	5.8	12.4	0	0	72	73.5	86.9	22.0	13.4	685
1977	5.5	4.0	2.5	-6.5	14.5	7.2	12.1	0	0	79	113.2	116.4	21.0	10.6	725
1978	4.9	4.6	1.4	-5.9	15.5	7.2	14.8	0	0	111	102.3	121.3	23.6	8.2	837
1979	4.5	4.3	1.4	-7.0	13.8	6.4	13.2	0	0	85	84.7	95.9	16.3	6.4	559
1980	4.7	4.2	1.5	-4.5	15.4	7.5	15.5	0	0	117	116.3	129.3	28.5	15.5	804
1981	4.5	4.2	1.4	-4.9	15.3	6.5	13.4	0	0	94	83.1	75.1	20.5	15.4	337
1982	4.9	4.2	2.0	-5.8	15.6	7.0	12.6	0	0	72	99.4	117.2	14.8	14.0	711
1983	3.6	4.1	0.4	-6.2	14.1	5.2	12.0	0	0	91	67.4	74.5	17.2	10.5	549
1984	4.1	4.0	1.2	-7.5	15.0	6.4	14.9	0	0	134	92.0	101.3	14.3	9.9	739
1985	4.3	4.4	1.0	-5.5	16.3	6.1	13.5	0	0	111	82.7	85.9	25.2	13.2	579
1986	4.5	4.1	1.5	-5.5	14.8	6.7	12.5	0	0	75	97.7	86.5	29.9	14.6	505
1987	4.8	4.3	1.9	-6.6	15.6	5.7	12.0	0	0	76	80.4	87.2	22.2	10.2	513
1988	4.0	4.3	0.5	-8.0	15.0	3.9	8.7	0	0	78	49.4	50.0	14.1	8.4	288
1989	4.1	4.2	1.0	-5.7	15.9	4.8	10.7	0	0	68	59.8	77.5	12.0	7.3	462
1990	4.0	4.4	0.5	-5.7	15.5	6.0	13.7	0	0	111	85.0	72.5	22.7	9.0	370
1991	4.1	4.3	0.6	-5.5	15.5	5.9	12.0	0	0	91	83.4	85.3	16.4	7.2	618
1992	4.2	4.4	1.1	-6.0	15.0	6.2	11.7	0	0	69	108.3	93.4	29.8	14.0	516
1993	4.6	4.4	1.5	-6.0	16.0	7.8	17.4	0	0	146	116.1	136.0	30.0	13.6	855
1994	5.2	4.2	2.2	-5.4	14.7	6.2	11.6	0	0	75	85.0	81.2	22.0	9.4	497
1995	4.0	4.3	1.0	-5.8	13.8	5.7	12.1	0	0	82	98.1	116.9	22.2	11.7	763
1996	3.7	4.2	0.9	-8.4	14.6	4.3	9.5	0	0	64	53.5	42.5	18.1	10.0	256
1997	4.8	4.2	1.6	-5.2	14.6	7.2	14.1	0	0	93	107.6	101.7	16.2	8.5	562

1998	4.5	4.1	1.5	-8.0	13.4	3.8	9.4	0	0	61	33.5	36.7	13.1	9.0	308
1999	4.6	4.2	1.7	-6.6	14.3	5.7	12.9	0	0	90	51.9	69.3	9.1	5.8	406
2000	4.5	4.2	1.6	-7.3	15.3	7.4	16.1	0	0	155	89.8	118.5	12.8	8.4	822
2001	4.8	4.0	2.0	-4.6	15.3	6.2	13.1	0	0	102	92.3	118.9	17.8	8.3	677
2002	5.1	4.0	2.4	-4.8	15.8	8.6	15.9	0	0	156	104.8	103.3	19.6	7.4	821
2003	5.2	4.1	2.1	-3.9	15.5	6.3	13.2	0	0	97	86.7	87.1	22.1	14.8	568
2004	5.8	4.2	2.7	-3.4	15.0	6.7	14.7	0	0	129	81.0	92.8	21.8	9.5	715
2005	4.6	4.2	1.1	-4.3	16.2	7.6	14.2	0	0	100	107.4	118.1	18.7	9.0	730
2006	4.7	4.2	1.6	-5.8	14.5	8.1	16.2	0	0	122	106.6	117.3	26.6	12.4	689
2007	4.2	4.3	1.2	-7.4	14.0	4.7	11.9	0	0	101	63.3	66.4	18.9	9.6	375
<b>Prom</b>	<b>4.6</b>	<b>4.2</b>	<b>1.5</b>	<b>-6.0</b>	<b>15.0</b>	<b>6.3</b>	<b>13.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>96.1</b>	<b>89.7</b>	<b>95.6</b>	<b>21.2</b>	<b>11.0</b>	<b>599</b>

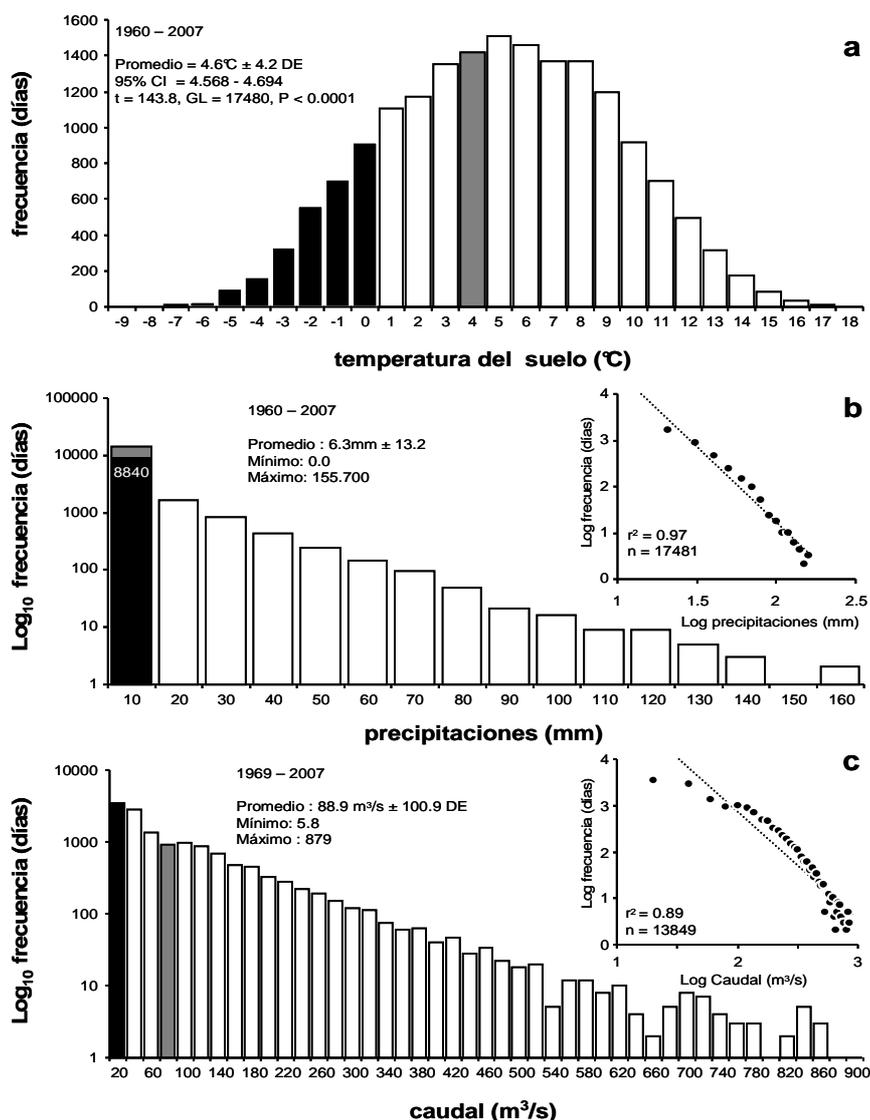
**Tabla 5.** Comparación entre el promedio histórico registrado en estadígrafos de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo y precipitaciones en Valdivia y del caudal del río Cruces, con el promedio de los estadígrafos observados en el año 2004. Q1 = cuartil 1; nca = no corresponde el análisis ya que el estadígrafo histórico no presenta variación. T= estadígrafo de prueba *t*-student de una cola; P = valor de probabilidad. Valores de T < 0 indican que  $\mu_{2004} > \mu_{\text{histórico}}$ .

estadígrafo	temperatura mínima del aire °C		precipitaciones mm		caudal m <sup>3</sup> /s	
	T	P	T	P	T	P
promedio	-18.62	< 0.0001	-2.46	0.016	2.24	0.031
Q1	-45.47	< 0.0001	nca	nca	-0.47	0.639
mínimo	-15.22	< 0.0001	nca	nca	2.45	0.019
máximo	0.00	1.00	-9.21	< 0.0001	-4.04	< 0.001

La distribución de frecuencias de las fluctuaciones en las temperaturas mínimas del aire del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo registradas en el Campus Isla Teja de la Universidad Austral de Chile en Valdivia, tiene un ajuste significativo con una distribución normal (Kolmogorov-Smirnov,  $P > 0.05$ ) (Fig. 19 a). En general, la distribución está centrada en torno a la media ( $4.6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 4.2 \text{ DE}$ ; IC 95% = 4.568 - 4.694;  $t = 143.8$ ;  $n = 17480$ ;  $P < 0.0001$ ). Los valores de temperatura inferiores a  $^\circ\text{C}$  presentan una frecuencia acumulada de 2819 eventos, lo cual corresponde al 16% de las observaciones diarias. Es decir, los eventos de temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo e inferiores a  $^\circ\text{C}$  no pueden considerarse “raros” o “anómalos” en la cuenca del río Cruces, más bien se puede postular que son comunes y parte del espectro de variación natural.

Las precipitaciones registradas en el período 1960-2007 muestran un promedio de  $6.3 \text{ mm} \pm 13.2 \text{ DE}$  y un máximo de  $155.7 \text{ mm}$  (Fig. 19 b). En este caso la distribución no es normal y se caracteriza por una alta frecuencia de eventos de baja magnitud o precipitaciones débiles (14485 días con precipitaciones  $< 10 \text{ mm}$ ) y de los cuales 8840 días (ca. 50% del total de observaciones) corresponden a ausencia de precipitaciones. Esto se refleja en que el valor mínimo (cero) también se corresponde con el Q1 y la moda de la distribución. Por lo tanto, las ausencias de precipitaciones tampoco pueden ser definidas como eventos raros o anómalos sino que muy por el contrario, esas ausencias son comunes en el espectro de variación para el periodo analizado. Es interesante destacar que las precipitaciones presentaron una relación inversa entre la magnitud y la frecuencia, lo que representado en escala logarítmica corresponde a una ecuación potencial con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.97$  (Fig. 19 b).

El caudal del río Cruces registrado en la estación Rucaco por la DGA durante el periodo 1969 - 2007 muestra un promedio de  $88.9 \text{ m}^3/\text{s} \pm 100.9 \text{ DE}$ , con un mínimo de  $5.8 \text{ m}^3/\text{s}$  y un máximo de  $879 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 19 c). La distribución de frecuencias es sesgada, con una mayor frecuencia de eventos de bajo caudal (3433 días de caudal  $< 20 \text{ m}^3/\text{s}$ ) lo cual representa un 24.7% de las observaciones para el período. El promedio a escala anual del Q1 toma el valor  $21.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que indica que el 25% de las observaciones está por debajo este valor (*cf.* Tabla 4). Consecuentemente, estos eventos tampoco pueden ser definidos como raros o anómalos, ya que también representan la moda de las fluctuaciones del caudal del río Cruces. En este caso, las fluctuaciones de caudal también presentaron una relación inversa entre la magnitud y la frecuencia, lo que representado en escala logarítmica corresponde a una ecuación potencial con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0.89$  (Fig. 19 c).



**Figura 19.** Distribución de frecuencias de las variables ambientales: (a) temperaturas mínimas del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo, (b) precipitaciones (a y b registradas en la estación meteorológica de la Universidad Austral de Chile (Campus Isla Teja, Valdivia) y (c) caudales del río Cruces registrados en la estación Rucaco de la Dirección General de Aguas (DGA). Las barras negras identifican eventos extremos y las barras grises identifican el promedio de los datos.

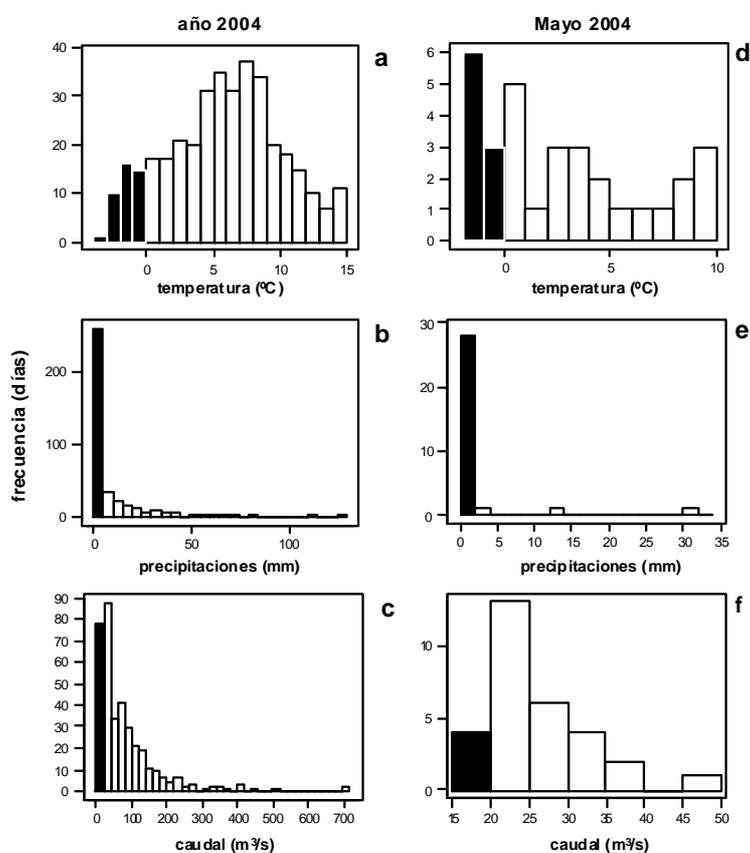
En términos cualitativos, la distribución de frecuencias de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo, precipitaciones y caudal del río Cruces, durante el año 2004 y durante el mes de Mayo del mismo año (Fig. 20), no se diferencia de lo

registrado incluyendo todo el periodo de estudio (Fig. 19). El año 2004 (año en que ocurren los cambios ambientales en el humedal del río Cruces), se caracterizó por una temperatura promedio del aire de  $5.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4.2\text{ DE}$ , con un mínimo de  $-3.4^{\circ}\text{C}$ , máximo de  $15^{\circ}\text{C}$  (Tabla 4) y una moda de  $8^{\circ}\text{C}$  (Fig. 20 a). El promedio anual de las precipitaciones fue de  $6.7\text{ mm} \pm 14.7\text{ DE}$ , con un máximo de 129 mm de agua caída (Tabla 4) y con una moda en eventos de nulas y bajas precipitaciones (Fig. 20 b). El caudal presentó una media de  $81.0\text{ m}^3/\text{s} \pm 92.8\text{ DE}$ , con un máximo de  $715\text{ m}^3/\text{s}$  (Tabla 4) y con una moda localizada entre los 20 y  $40\text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 20 c).

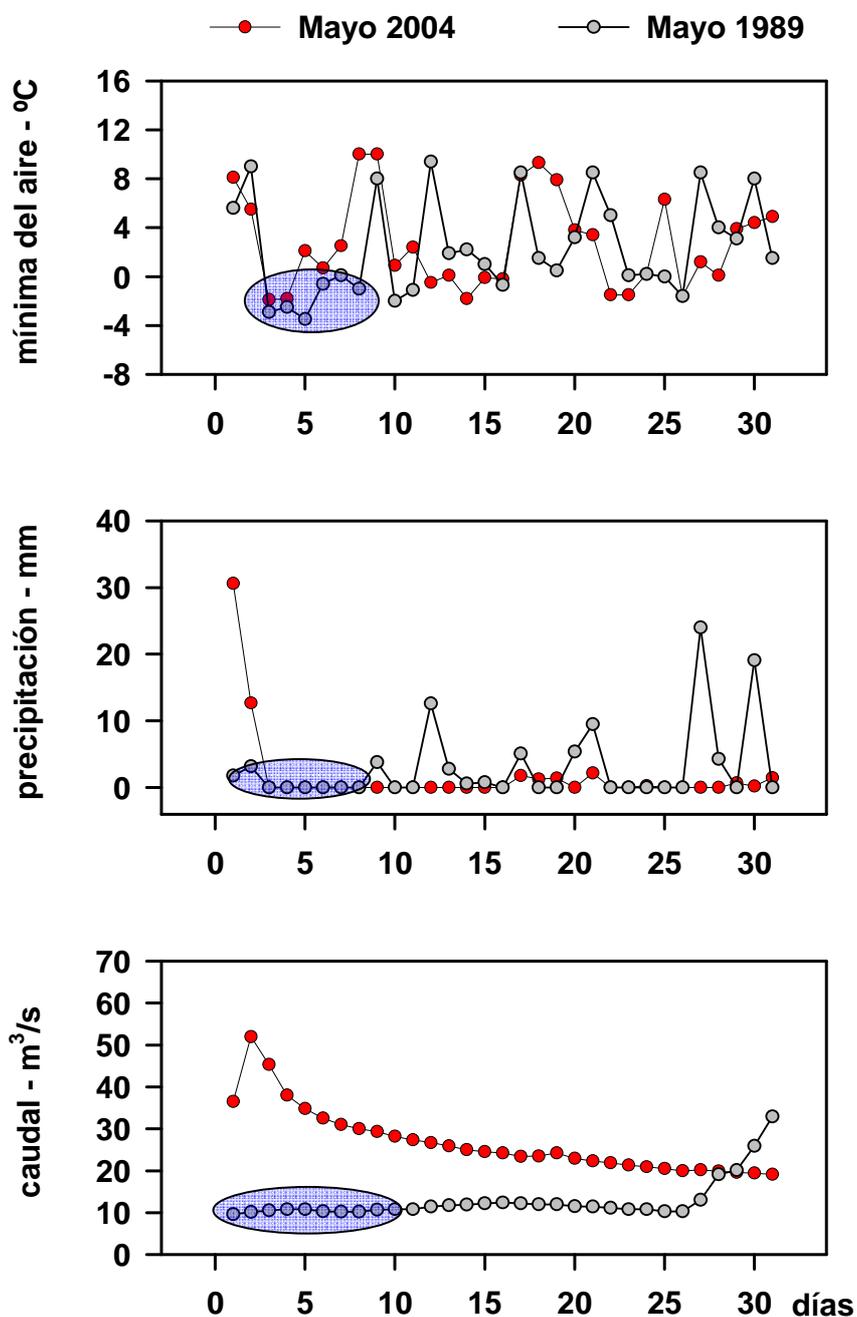
El mes de Mayo del año 2004, propuesto por Marín *et al.* 2008 (a, b) como el periodo en el que habría ocurrido el evento inicial que gatilló la mortalidad masiva de *Egeria densa*, se caracterizó por presentar 9 días de temperaturas bajo cero (Fig. 20 d), 28 días de precipitaciones entre 0 y 2 mm (Fig. 20 e) y una dominancia de eventos de caudal entre 20 y  $25\text{ m}^3/\text{s}$  y cuatro días con caudales menores (Fig. 20 f). Los análisis anteriores sugieren que a pesar de que el año 2004 presenta propiedades estadísticas similares a lo registrado históricamente en el área de estudio, durante el mes de Mayo de ese año co-ocurrieron los eventos sugeridos por Marín *et al.* (2008 a, b). Por lo tanto, corresponde preguntarse si estos eventos habían ocurrido o no en periodos anteriores a Mayo del año 2004.

Las Figuras 21, 22 y 23 muestran la variabilidad diaria de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo, precipitaciones (datos obtenidos de la estación meteorológica del Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile en su Campus Isla Teja, Valdivia) y caudales del río Cruces en Rucaco (datos DGA), registrada durante Mayo de los años 2004, 1989, 1988 y 1985. Tal como se observa en esas figuras, días con coincidencia de temperaturas bajo cero, ausencia de precipitaciones y bajo caudal ( $< 20 - 30\text{ m}^3/\text{s}$ ) también fueron frecuentes durante Mayo de los años 1989, 1988 y 1985. Más aún, durante estos últimos años se registró en general un mayor número de días consecutivos con esas características.

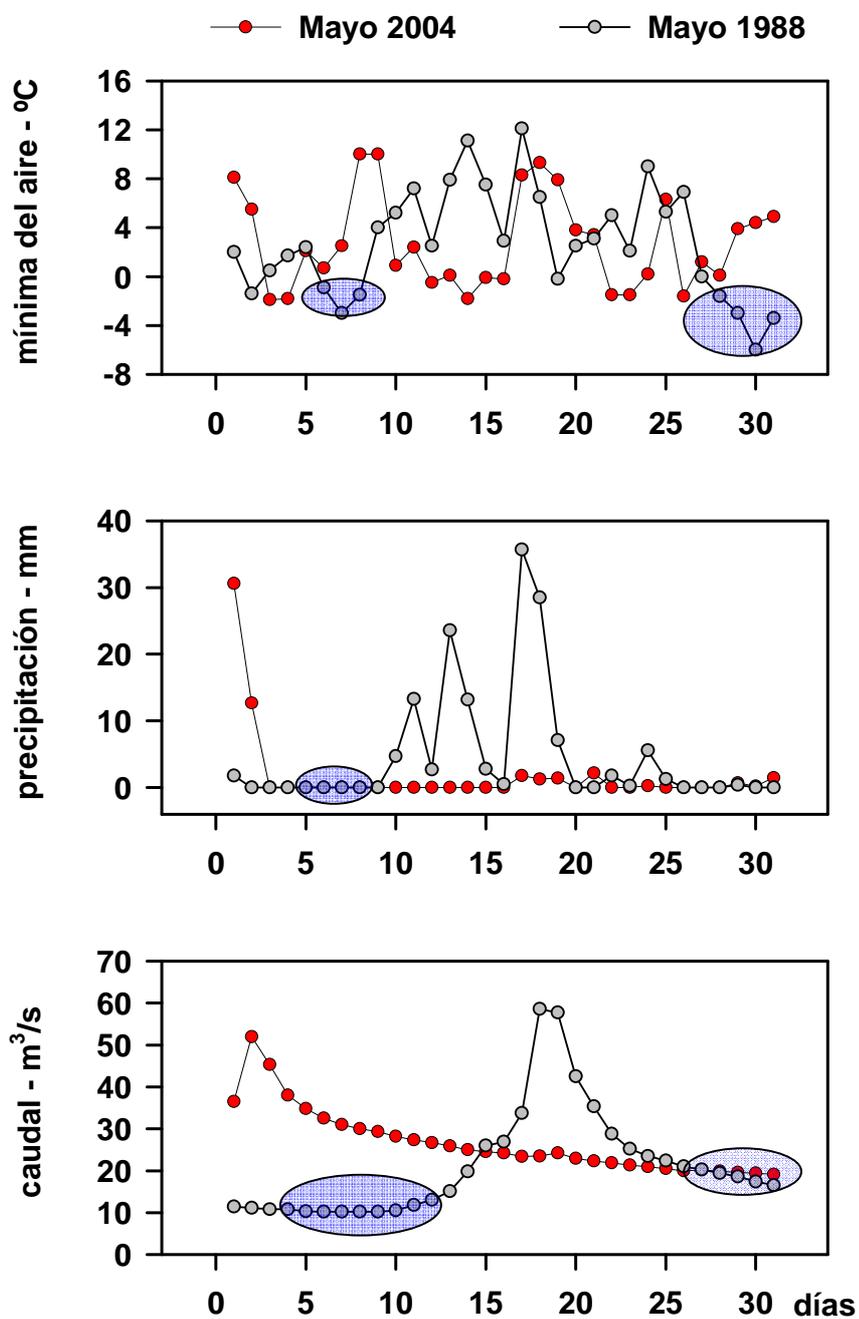
Estos análisis descriptivos muestran que las condiciones señaladas por Marín *et al.* (2008 a, b), como causantes de la mortalidad masiva de *Egeria densa* en el humedal del río Cruces, han ocurrido con anterioridad a Mayo del 2004. Sin embargo, durante esas condiciones, la cobertura de Luchecillo no disminuyó drásticamente, conclusión que se apoya en el hecho que durante esos años las abundancias poblacionales de Cisnes de cuello negro y Taguas no se vieron afectadas como durante el año 2004 (*cf.* Fig. 1 y 2 en Punto 2.2 de este Informe).



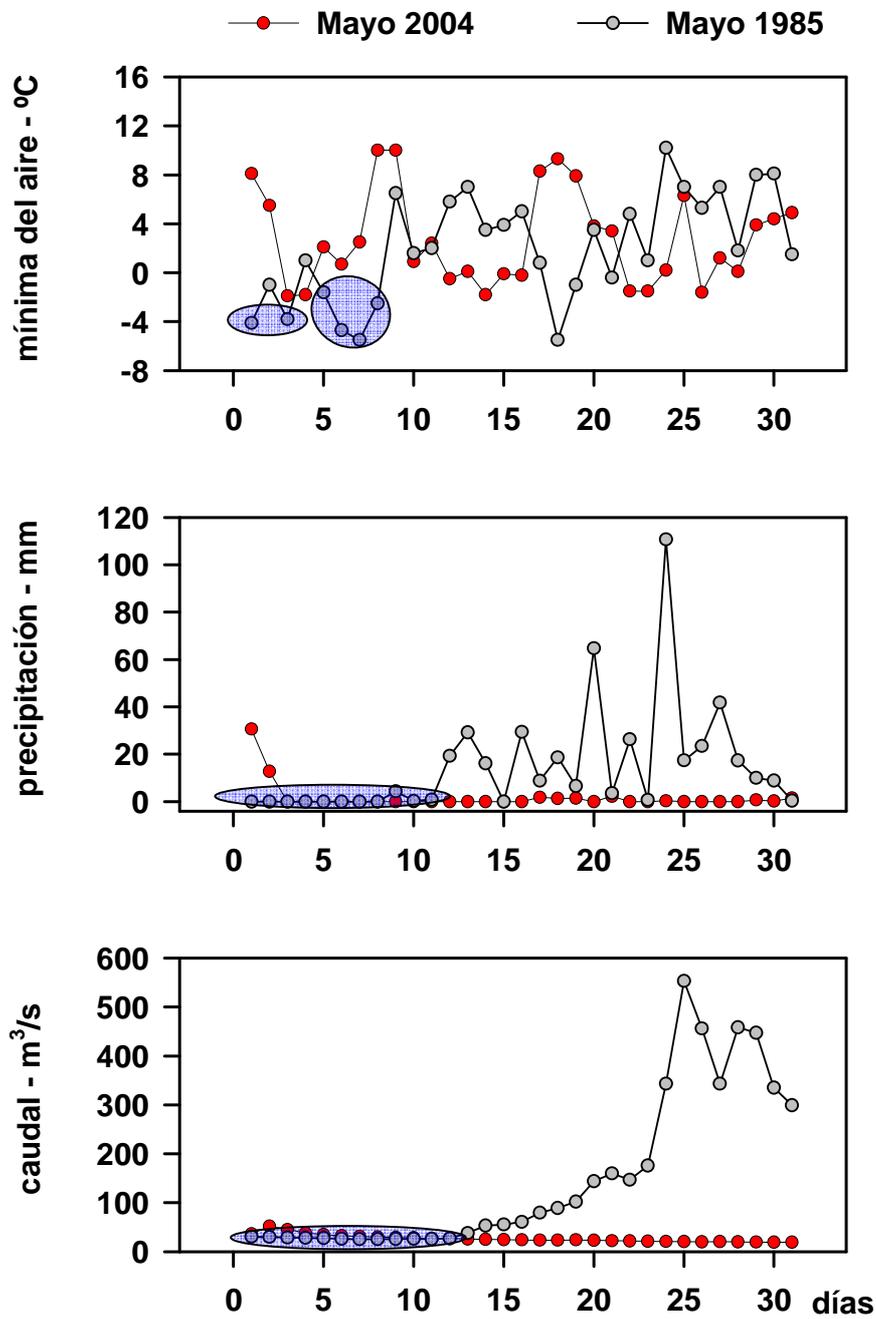
**Figura 20.** Distribución de frecuencias en temperaturas mínimas del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo, precipitaciones y caudales del río Cruces durante el año 2004 (a, b y c) y mes de Mayo del mismo año (d, e y f).



**Figura 21.** Variabilidad diaria de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el suelo, precipitaciones y caudal del río Cruces: Mayo 2004 *versus* Mayo 1989. Las elipses en azul señalan los días con coincidencia de temperaturas bajo cero, nula precipitación y caudales inferiores a 20-30 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 22.** Variabilidad diaria de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el suelo, precipitaciones y caudal del río Cruces: Mayo 2004 *versus* Mayo 1988. Las elipses en azul señalan los días con coincidencia de temperaturas bajo cero, nula precipitación y caudales inferiores a 20-30 m<sup>3</sup>/s.

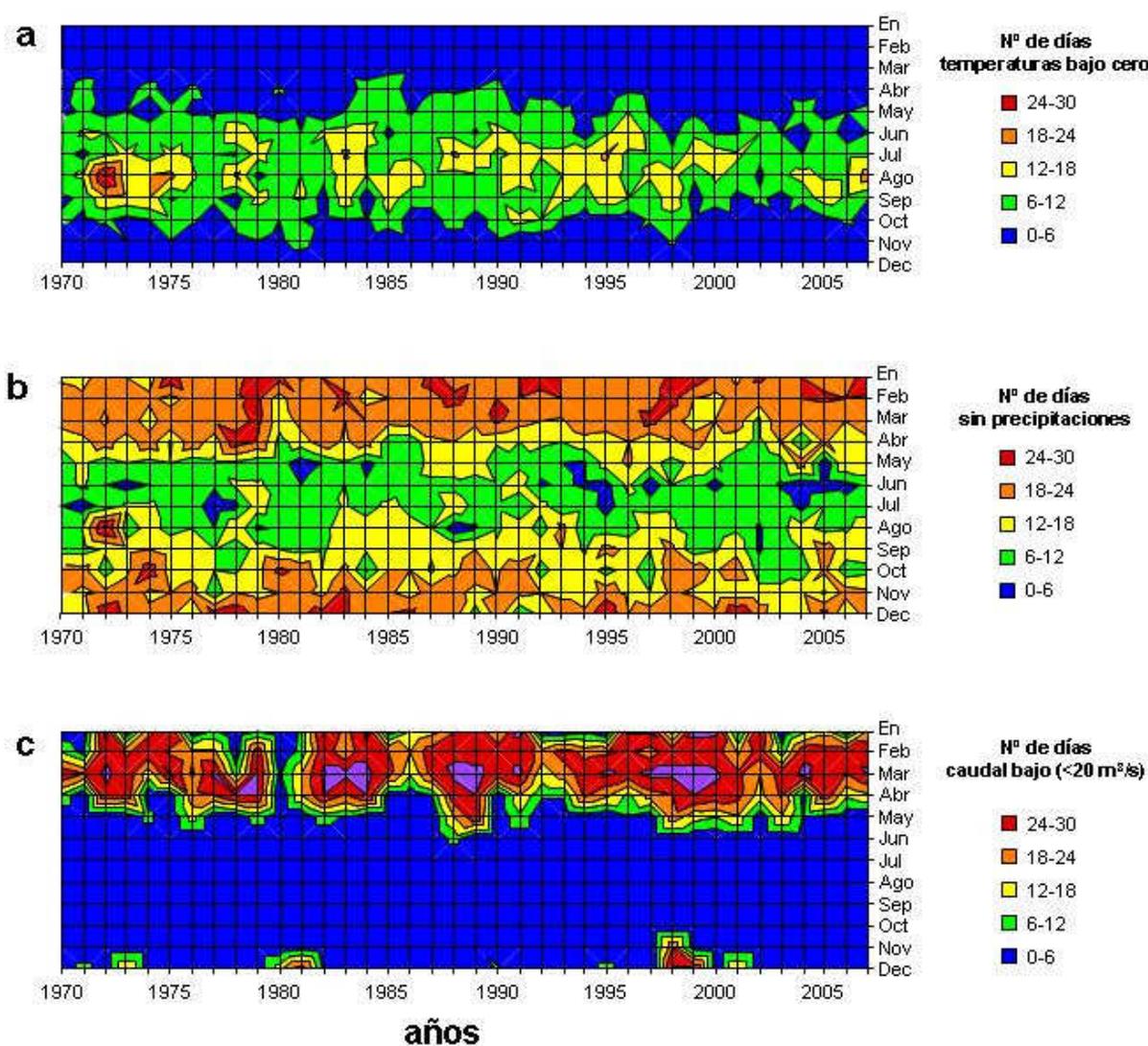


**Figura 23.** Variabilidad diaria de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el suelo, precipitaciones y caudal del río Cruces: Mayo 2004 *versus* Mayo 1985. Las elipses en azul señalan los días con coincidencia de temperaturas bajo cero, nula precipitación y caudales inferiores a 20-30 m<sup>3</sup>/s.

Los datos representados en las Figuras 21 a 23 muestran situaciones puntuales de la variabilidad de la temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo, precipitaciones y caudal del río Cruces durante el mes de Mayo de diferentes años. A continuación se presenta un análisis sistemático y general de estas condiciones ambientales observadas durante las últimas cuatro décadas en el área de estudio.

La matriz resultante del proceso de reclasificación binaria y acumulación mensual de la ocurrencia de eventos de temperatura bajo cero [ $T_{(<0^{\circ}\text{C})}$ ], eventos sin precipitaciones [ $PP_{(0)}$ ] y eventos de bajo caudal [ $C_{(<20\text{ m}^3/\text{s})}$ ] para cada año del periodo de estudio se representa en la Figura 24. En general, los eventos de temperaturas bajo cero ocurren en baja frecuencia y con valores entre 0 y 6 eventos mensuales desde mediados de primavera hasta mediados de otoño de cada año. Como es esperable, durante los meses de invierno, las temperaturas bajo cero se hacen más comunes ocurriendo entre 6 y 18 días de cada mes (Fig. 24 a). Durante el mes de Mayo del año 2004 se registraron 9 eventos de bajas temperaturas. Sin embargo, meses con más de 18 días con temperaturas bajo cero se han registrado durante los meses de Julio o Agosto de los años 1972, 1974, 1975, 1983, 1995 y 2007 (Fig. 24 a). Para el caso de eventos de ausencia de precipitaciones, se puede resaltar que entre Noviembre y Abril (primavera-inicios del otoño) ocurre tal tipo de eventos con alta frecuencia (más de 18 días sin precipitaciones en cada mes) (Fig. 24 b). Sin embargo, para los meses de Abril a Septiembre, aproximadamente, los eventos de ausencia de precipitaciones son menos comunes y ocurren sólo entre 6 y 12 días para cada mes. Entre Mayo y Agosto, los días sin precipitaciones son más escasos con ocurrencia menor a 6 días sin precipitaciones (*i.e.*, meses lluviosos). Durante el mes de Mayo del año 2004 se registraron 21 días sin precipitaciones, por lo que podría considerarse un mes seco respecto a otros periodos del otoño e invierno. Sin embargo, situaciones relativamente similares se registraron en Agosto de 1972 (31 días sin lluvia) y Mayo de 1996 (19 días sin lluvia) (Fig. 24 b). Para el caso de eventos de caudal bajo  $20\text{ m}^3/\text{s}$ , se puede resaltar que entre los meses de Diciembre a Abril/Mayo de cada año, estos alcanzan ocurrencias por sobre los 24 días (Fig. 24 c). Desde Abril-Mayo a Diciembre la situación se revierte registrándose una baja ocurrencia de eventos de caudal por bajo los 20

m<sup>3</sup>/s. Durante el mes de Marzo de los años 1979, 1982, 1983, 1984, 1988, 1989, 1997, 1998, 1999, 2000 y 2004, el caudal fue bajo durante todo el mes. Para Mayo del año 2004 se registran menos de 6 eventos de caudal bajo los 20 m<sup>3</sup>/s, lo cual es similar a lo registrado durante Mayo de los años 1971, 1974, 1975, 1980, 1985, 1986, 1987, 1990, 1992, 1993, 1994 y 1995 (Fig. 24 c).



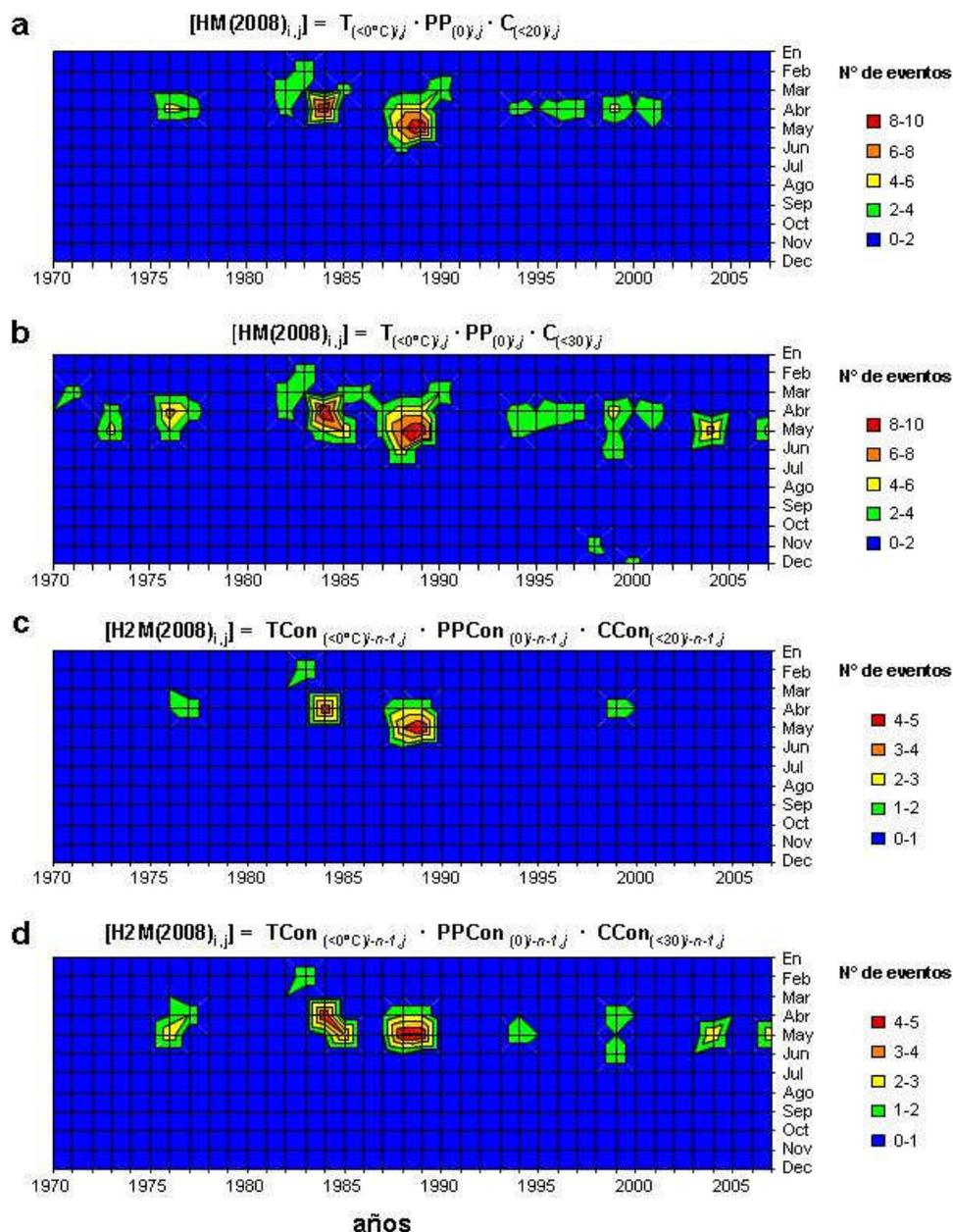
**Figura 24.** Variabilidad mensual del número acumulativo de días con temperaturas del aire bajo cero °C (a), sin precipitaciones (b) y caudal menor a 20 m<sup>3</sup>/s (c) para cada año del periodo de estudio.

Los resultados anteriores muestran que para cada variable analizada, las condiciones “extremas” descritas por Marin *et al.* (2008 a, b) se han observado en otras ocasiones, incluso en mayor frecuencia que lo registrado durante Mayo del año 2004. Sin embargo, lo anterior se refiere a la ocurrencia de eventos extremos por separado y no a co-ocurrencia de estos. Al multiplicar las matrices binarias para obtener la matriz que reúne la co-ocurrencia de eventos extremos propuesto por Marin *et al.* (2008 a),  $[HM(2008)_{i,j}]$ , se observa que durante el mes de Mayo del año 2004 sólo co-ocurren eventos con temperatura bajo cero, ausencia de precipitaciones y caudal menor a 20 m<sup>3</sup>/s en sólo un día (22 de Mayo). Nótese, que bajo la escala categórica usada en la Figura 25 a la co-ocurrencia de estos eventos no se manifiesta debido a que corresponde al color azul (0-6 días) que domina en gran parte del periodo estudiado. Esta discrepancia se debe principalmente al criterio de corte para definir un caudal como “bajo”, dado que el caudal observado durante Mayo del año 2004 es mayor al valor del Q1 definido en nuestro análisis como el extremo inferior de la distribución de frecuencias de la variable caudal. Marin *et al.* (2008 a) (pág. 61) sostienen que el caudal de Mayo del año 2004 es “bajo” en relación al promedio histórico observado entre 1969 al 2004. Sin embargo, este “bajo” caudal ya se había registrado en Mayo de los periodos 1982-1983, 1987-1989 y 1998-2000.

Con el objetivo de evaluar si en el mes de Mayo del año 2004 co-ocurrieron esos eventos extremos, se aumentó el criterio para definir un caudal bajo utilizándose un valor de 30 m<sup>3</sup>/s. Esto permite incluir los valores de caudal observados durante Mayo del año 2004. Los resultados de la matriz  $[HM(2008)_{i,j}]$  con este valor de caudal se muestran en la Figura 25 b, donde se observa claramente la co-ocurrencia de 7 eventos extremos en Mayo del 2004, mayor a los 3 eventos propuestos por Marín *et al.* (2008 a, b). Lo anterior permite destacar tres aspectos importantes del presente estudio: i) la necesidad de procesar adecuadamente los datos para identificar eventos ambientales extremos de una manera sistemática, ii) la co-ocurrencia de estos eventos extremos se había manifestado a frecuencias similares y aún mayores durante los meses de Abril o Mayo de los años 1976, 1984, 1985, 1998 y 1999, y iii) el evento de Mayo del año 2004 sólo se detecta cuando se utiliza un valor de caudal mayor al Q1, valor que no es

extremadamente bajo relativo al espectro de variación del caudal del río Cruces. Bajo condiciones más extremas se registró que la co-ocurrencia de estos eventos ya se había manifestado durante Abril o Mayo de 1976, 1984, 1989 y 1999 hasta durante 10 días de cada mes (Figura 25 b). Además, se evaluó la importancia de la persistencia temporal de co-ocurrencia de eventos extremos. Para esto se obtuvo una matriz  $[H2M(2008)_{i,j}]$  donde se evaluó si las condiciones sugeridas por Marín *et al.* (2008 a, b), co-ocurren y persisten por al menos dos días.

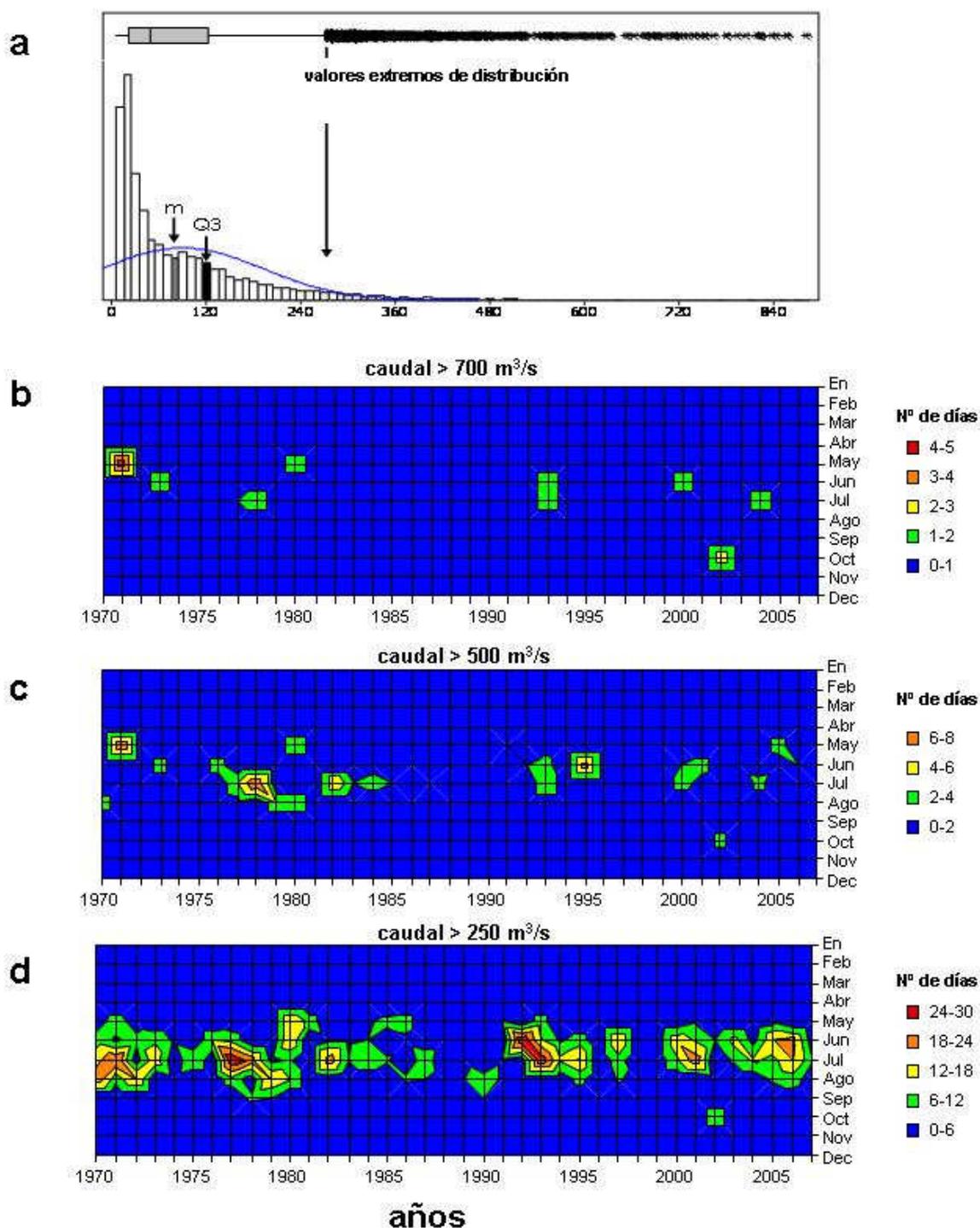
Los resultados indican que la co-ocurrencia de estos eventos extremos se reducen prácticamente a la mitad (desde 8-10 días a 4-5 días como máximo, *cf.* Fig. 25 a y 25 c). Obviamente, para condiciones extremas en todas las variables, no se observan eventos consecutivos durante el año 2004 (Fig. 25 c). De hecho, los tres eventos fríos propuestos por Marín *et al.* (2008 a, b) no son consecutivos. Por otra parte, al subir el valor de caudal a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  (condiciones por sobre Q1 o menos extremas), se observa la ocurrencia de los eventos propuestos por Marín *et al.* (2008 a, b), los cuales se hacen menos frecuentes dentro de cada mes (Fig. 25 d). La co-ocurrencia de estos eventos extremos y consecutivos también se había registrado durante Abril o Mayo de los años 1976, 1985, 1986, 1988, 1999 y 2007.



**Figura 25.** Variabilidad mensual del número acumulado de eventos (días) en que co-ocurrieron condiciones de temperaturas del aire bajo cero °C, ausencia de precipitaciones y caudal bajo en el río Cruces para cada año del periodo de estudio (Hipótesis de Marin *et al.* 2008 a, b). En a y b se presentan los eventos diarios con caudal menor a 20 m<sup>3</sup>/s y 30 m<sup>3</sup>/s, respectivamente y en c y d eventos consecutivos (2 días en que co-ocurrieron las condiciones postuladas por Marin *et al.* (2008 a, b) con caudal menor a 20 m<sup>3</sup>/s y 30 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Finalmente, Marín *et al.* (2008 a) señalan que **“es poco probable que un evento de aumento del caudal o pulso de inundación, haya sido el principal mecanismo que dispara la desaparición de *Egeria densa* desde el humedal de río Cruces”** (pág. 45). También sostienen que **“un pulso de inundación que llega a generar u (sic) caudal cercano a los 800 m<sup>3</sup>/s acentuando aún más la re-suspensión de sedimentos”** podría haber contribuido a la disminución de *Egeria densa* por sombreamiento” (Marín *et al.* 2008 a; pág. 72).

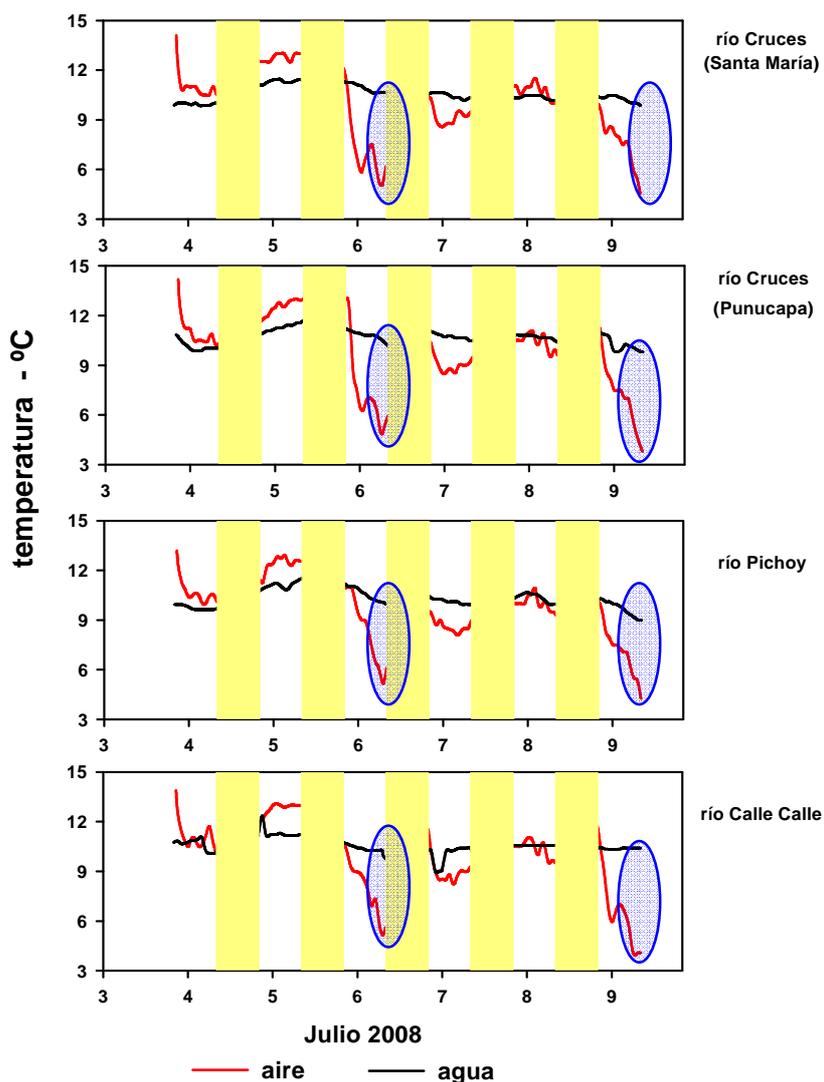
Para evaluar las aseveraciones anteriores se repitió el proceso de reclasificación binaria para evaluar la ocurrencia de eventos de pulsos de inundación utilizando el Q3 de la distribución de frecuencias, como criterio para definir estos eventos. El Q3 de la distribución de frecuencias del caudal corresponde a 122 m<sup>3</sup>/s (Fig. 26 a), valor que podría considerarse demasiado bajo como para representar un “pulso de inundación”. Sin embargo, la revisión del histograma de frecuencias permite notar que valores de caudal superiores a 250 m<sup>3</sup>/s ya son “raros”, lo cual se corresponde con el valor más bajo de caudal máximo registrado históricamente y que ocurrió en 1996 (Tabla 4). Las Figuras 26 b, c y d, muestran la ocurrencia de eventos con caudal mayor a 700, 500 y 250 m<sup>3</sup>/s. El pulso de inundación de Julio del año 2004 fue de 715 m<sup>3</sup>/s, magnitud ya registrada en periodos anteriores (Fig. 26 b). La representación de valores extremos de caudal (> 250 m<sup>3</sup>/s), permite notar que estos eventos han sido parte del espectro de variación natural del río Cruces a través del periodo de estudio y más frecuentes entre Mayo y Septiembre de cada año (Fig. 26 d). En general y debido a las dimensiones del río Cruces, caudales superiores a 200 m<sup>3</sup>/s representarían eventos de inundación (*cf.* Punto 6.4. de este estudio), lo cual está en cercana concordancia con el criterio estadístico usado para definirlos en este análisis.



**Figura 26.** Histograma de frecuencias del caudal del río Cruces detallando la media, cuartil 3 y extremos máximos (m, Q3 y flecha, respectivamente). En b, c y d se presenta el número acumulado de eventos de “inundación” para caudales del río Cruces mayores a 700, 500 y 250 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

### 6.3. Variabilidad de la temperatura del aire y del agua en diferentes sitios del humedal del río Cruces y río Calle Calle

La Figura 27 muestra la variabilidad de la temperatura del aire y del agua en los sitios de registros ubicados en los ríos Cruces, Pichoy y Calle Calle. Como esperable, la temperatura del agua mostró escasa variabilidad horaria. Por el contrario, la temperatura del aire mostró diferencias horarias de hasta aproximadamente 5-6 °C.



**Figura 27.** Variabilidad de la temperatura del aire y del agua en los sitios de estudio (solo se muestran los datos obtenidos entre las 22:00 PM y 9:00 AM de cada día). Las elipses azules indican aquellos períodos de medición cuando las diferencias entre temperaturas del agua y del aire fueron las más altas (cf. Tabla 6).

Lo anterior también se ilustra en la Tabla 6, donde se muestran las diferencias ( $\Delta$  °C) entre las temperaturas promedio del aire y del agua para los períodos horarios y días donde se registraron las temperaturas más bajas. Esta tabla muestra que en esos períodos y días, la temperatura promedio del aire varió entre 4.04 y 6.08 °C, a la vez que la del agua varió entre 9.00 y 10.65 °C, con diferencias ( $\Delta$  °C) de hasta 6.32-6.37 °C.

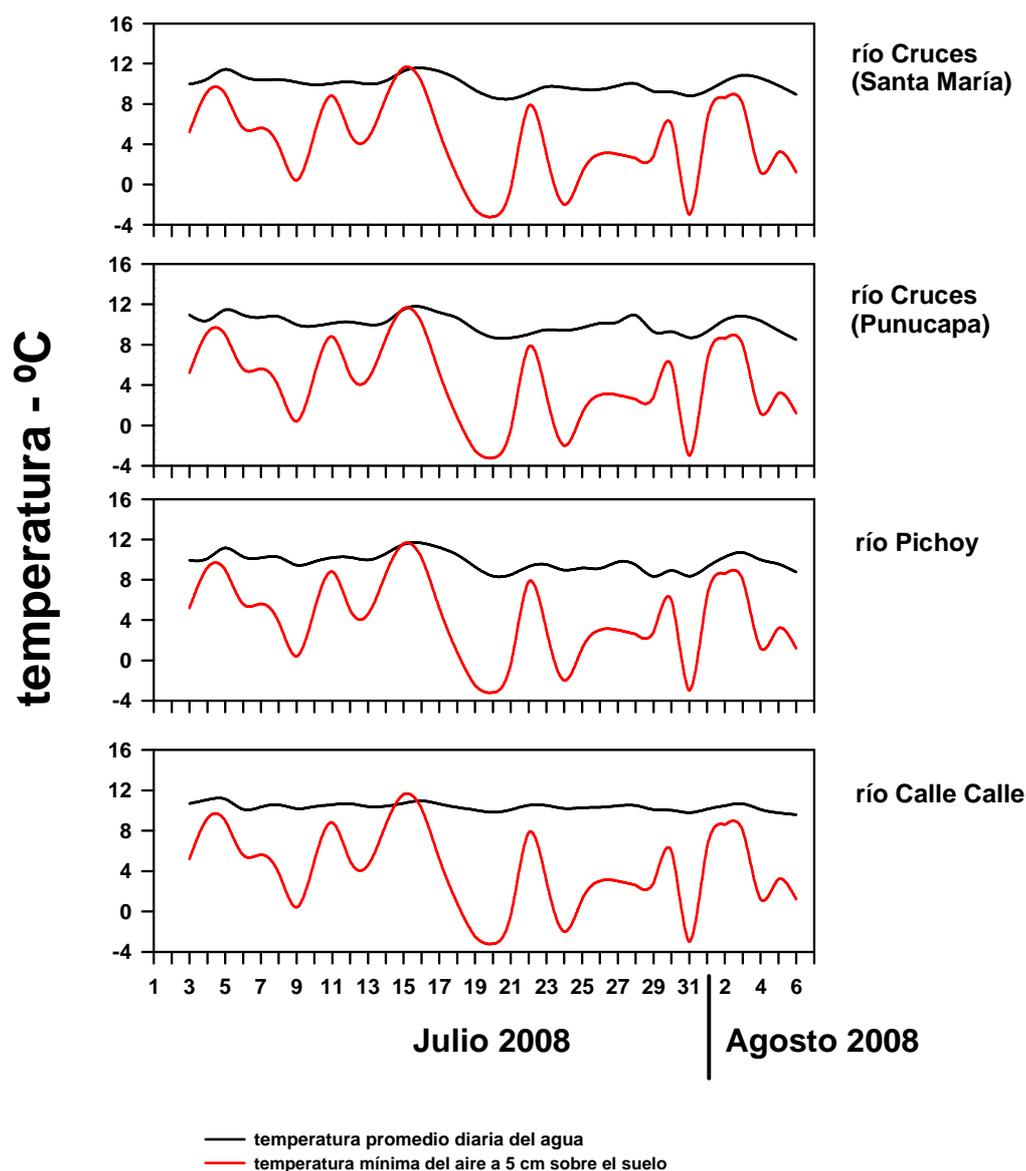
**Tabla 6.** Temperaturas promedio del aire y del agua durante los días de mayores diferencias ente las mismas. Se muestran también los valores de esas diferencias ( $\Delta$  °C).

	temperatura promedio del aire	temperatura promedio del agua	$\Delta$ °C
río Cruces (Santa María)			
6 de Julio 5 – 7 am	5.29	10.64	5.35
6 de Julio 6 – 7 am	5.13	10.65	5.52
9 de Julio 6 – 7 am	5.50	10.01	4.51
9 de Julio 6 – 7 am	4.54	9.86	5.32
río Cruces (Punucapa)			
6 de Julio 5 – 7 am	4.88	10.56	5.68
6 de Julio 6 – 7 am	5.33	10.38	5.05
9 de Julio 6 – 7 am	4.38	9.86	5.48
9 de Julio 6 – 7 am	3.79	9.80	6.01
río Pichoy (Tralcao)			
6 de Julio 5 – 7 am	5.91	10.11	4.20
6 de Julio 6 – 7 am	5.16	10.07	4.91
9 de Julio 6 – 7 am	5.33	9.02	3.69
9 de Julio 6 – 7 am	4.25	9.00	4.75
río Calle Calle (Santa Elvira)			
6 de Julio 5 – 7 am	6.08	10.25	4.17
6 de Julio 6 – 7 am	5.17	10.22	5.05
9 de Julio 6 – 7 am	4.04	10.41	6.37
9 de Julio 6 – 7 am	4.08	10.40	6.32

Finalmente, la Figura 28 muestra la variabilidad de la temperatura del agua en los ríos Cruces, Pichoy y Calle Calle y la del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo entre el 3 de Julio y 6 de Agosto del año 2008. Tal como mencionado anteriormente, la

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

temperatura del agua muestra escasa variabilidad temporal (con promedios cercanos a 10.8 °C), aún cuando la temperatura del aire bajó hasta -2 a -3 °C durante algunos días. Todo lo anterior, muestra que la temperatura del agua en el humedal del río Cruces y cauces tributarios no es afectada mayormente por la variabilidad en la temperatura del aire.



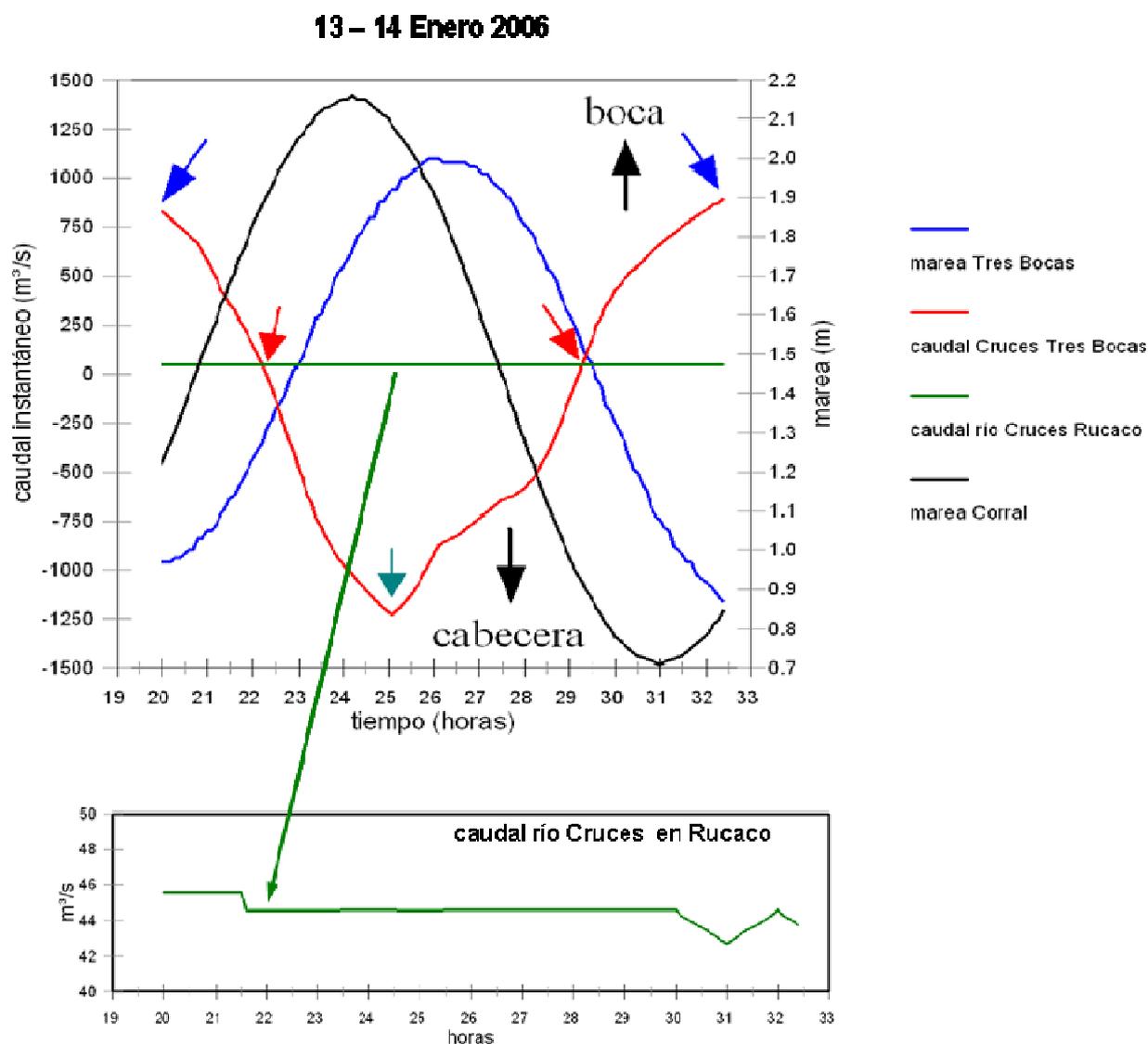
**Figura 28.** Variabilidad de la temperatura promedio diaria del agua y temperatura mínima del aire a 5 cm sobre el nivel del suelo en los sitios de estudio. Las temperaturas del agua provienen de los sensores instalados durante este estudio, a la vez que las del aire fueron recolectadas del registro periódico de la estación meteorológica del Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile.

#### 6.4. Hidrodinámica

La Figura 29 muestra la variación temporal de caudal y marea en el sector Tres Bocas, río Cruces, desde las 19 horas del día 13 de Enero a las 9 horas del día 14 de Enero, expresadas como 19 a 33 horas decimales. La pleamar de la sicigia nocturna ocurrió a las 2 AM del día 14. El rango, medido *in situ*, fue de 1.2 m. La altura absoluta de la marea no fue calculada con exactitud debido a que no se contó con georeferenciación de GPS diferencial, pero fue calibrada con la marea de Corral. Debido a esto, se muestra como referencia en la Figura 29 la curva de marea predicha por el software WXTIDE 32 versión 4.4, para la boca del estuario Valdivia en Corral, con un rango de 1.45 m. Se observa que la marea dentro del humedal del río Cruces se desfasa en 2.5 horas, después de recorrer aproximadamente 33 Km desde Corral.

En la misma Figura 29 se grafica el caudal instantáneo del río Cruces en el sector Tres Bocas. Los valores positivos indican caudales dirigidos hacia la boca, a la vez que los valores negativos se refieren a caudales dirigidos hacia la cabecera del estuario. El caudal es nulo a la hora 22.5 y 29.25 (flechas rojas en Fig. 29) cuando la marea tiene aproximadamente 1.45 m (Fig. 29). El caudal máximo dirigido aguas arriba o hacia la cabecera es cercano a  $1250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en la hora 25 (flecha verde en Fig. 29), al final de la creciente y con una altura de marea cercana a 0.85 m (Fig. 29). El caudal máximo dirigido hacia la boca de la zona estuarial de Valdivia (Corral) se observa al comienzo y fin de las mediciones (flechas azules en Fig. 29) con valores del orden de  $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , cuando la marea tiene un altura de aproximadamente 0.90 m (Fig. 29).

Durante el período de estudio, el caudal del afluente de agua dulce (río Cruces en Rucaco), varió entre  $42.68$  y  $45.57 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Fig. 29); es decir dos órdenes de magnitud menores que los caudales máximos en el estuario del río Cruces. En Rucaco, la altura del río en el período de estudio fluctuó entre 129 y 132 cm. Estos 3 cm de rango son menores en dos órdenes de magnitud con respecto al rango de la altura del agua debido a la marea (120 cm) en el mismo momento (Fig. 29).



**Figura 29.** Variación de caudal y marea en el estuario del río Cruces, sector Tres Bocas. Las flechas azul y verde indican cuando el caudal es máximo hacia la boca y cabecera respectivamente, a la vez que las flechas rojas muestran cuando el caudal es nulo (período de estoa).

Los análisis anteriores ponen en evidencia que el nivel del agua en el estuario, no tiene relación en momento alguno con el caudal o la altura del río Cruces, tal como lo describe la teoría general de estuarios. De ahí que la sola revisión de la literatura habría permitido llegar a la misma conclusión; sin embargo, se prefirió analizar resultados no

publicados por investigadores de la Universidad Austral de Chile con el objetivo de mostrar claramente el hecho de que la altura del espejo de agua dentro del humedal del estuario del río Cruces no está relacionada con la altura o el caudal del río Cruces, medidos en Rucaco.

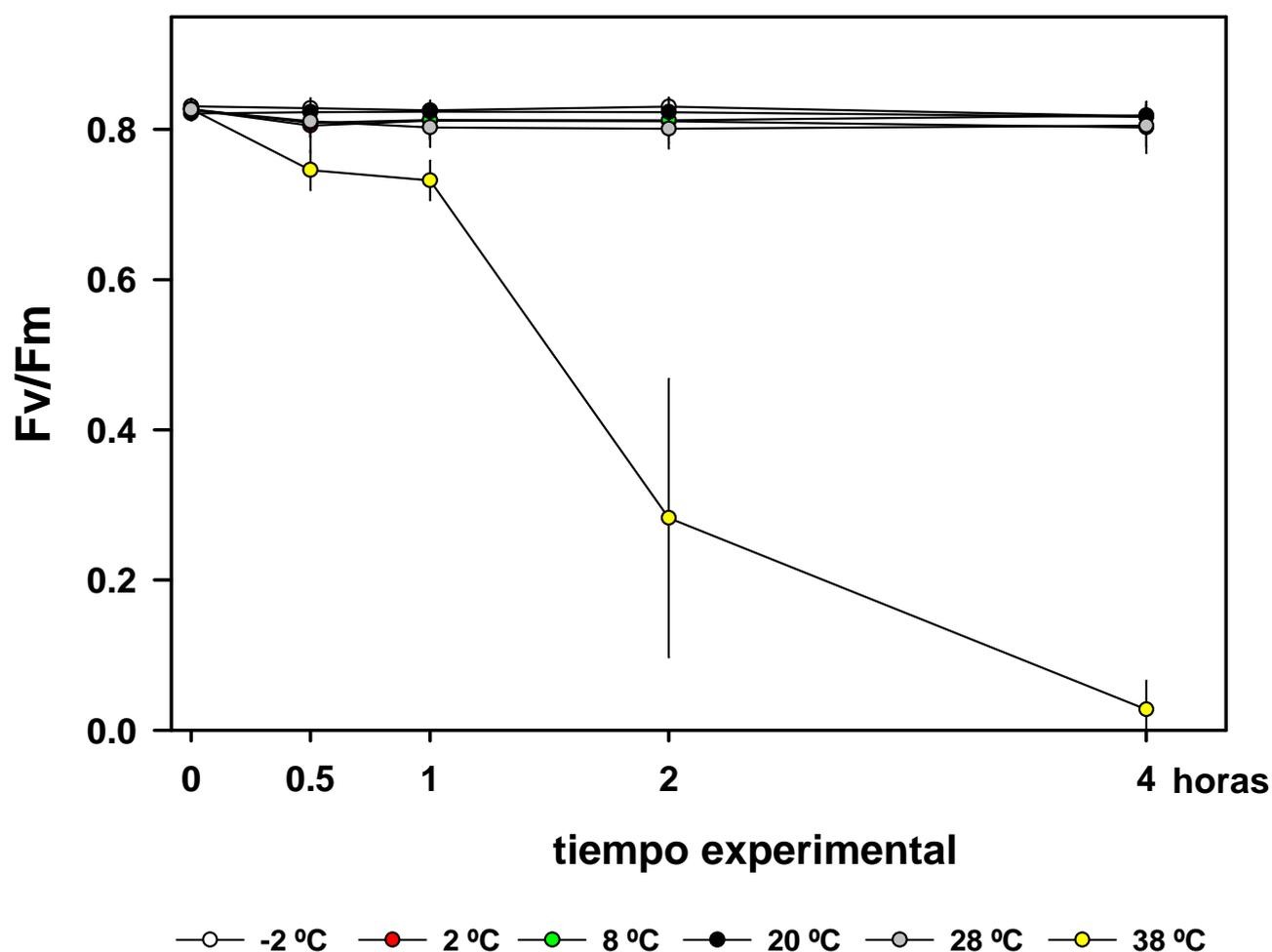
## **6.5. Tolerancia del Luchecillo a temperaturas extremas del agua**

### ***Experimento 1***

En este experimento se evaluó la resistencia de las plantas de *Egeria densa* expuestas a diferentes temperaturas, evaluando la funcionalidad del aparato fotosintético. En este caso, todas las plantas estuvieron sumergidas en agua e incluyó la evaluación del efecto de diferentes tiempos de exposición para cada temperatura (Figura 30).

Los resultados indican que existe un efecto significativo entre las diferentes temperaturas a las cuales fueron expuestas las plantas (Tabla 7). Los valores de Fv/Fm fueron significativamente más bajos en las plantas expuestas a 38 °C en el agua (prueba *a posteriori* de Tukey). También se encontraron efectos significativos en los tiempos de exposición (Tabla 7). La evaluación de ambos factores en conjunto muestra que las plantas que disminuyeron sus valores de Fv/Fm corresponden a todas las muestras de plantas expuestas a 38 °C (Tabla 7). Estos resultados muestran que la única temperatura del agua que afecta negativamente a las plantas de *Egeria densa* es 38 °C, efecto que aumenta a medida que incrementa la exposición (Figura 30).

Para el caso de las bajas temperaturas no se encontró ningún efecto significativo, lo cual sugiere que plantas sumergidas pueden soportar sin problema temperaturas de -2 °C hasta por 4 horas sin manifestar disminución en sus valores de Fv/Fm.



**Figura 30.** Variabilidad de la relación Fv/Fm en plantas de Luchecillo expuestas a -2, 2, 8, 20, 28 y 38 °C durante 0.5, 1, 2 y 4 horas de exposición (ver Materiales y Métodos).

**Tabla 7.** Resumen de ANDEVA de dos vías evaluando el efecto del tiempo de exposición a la fuente de perturbación bajo diferentes temperaturas.

	grados de libertad	F	P
temperatura	5.536	1046.7	<0.001
tiempo	3.536	197.2	<0.001
temperatura x tiempo	15.536	241.6	<0.001

## **Experimento 2**

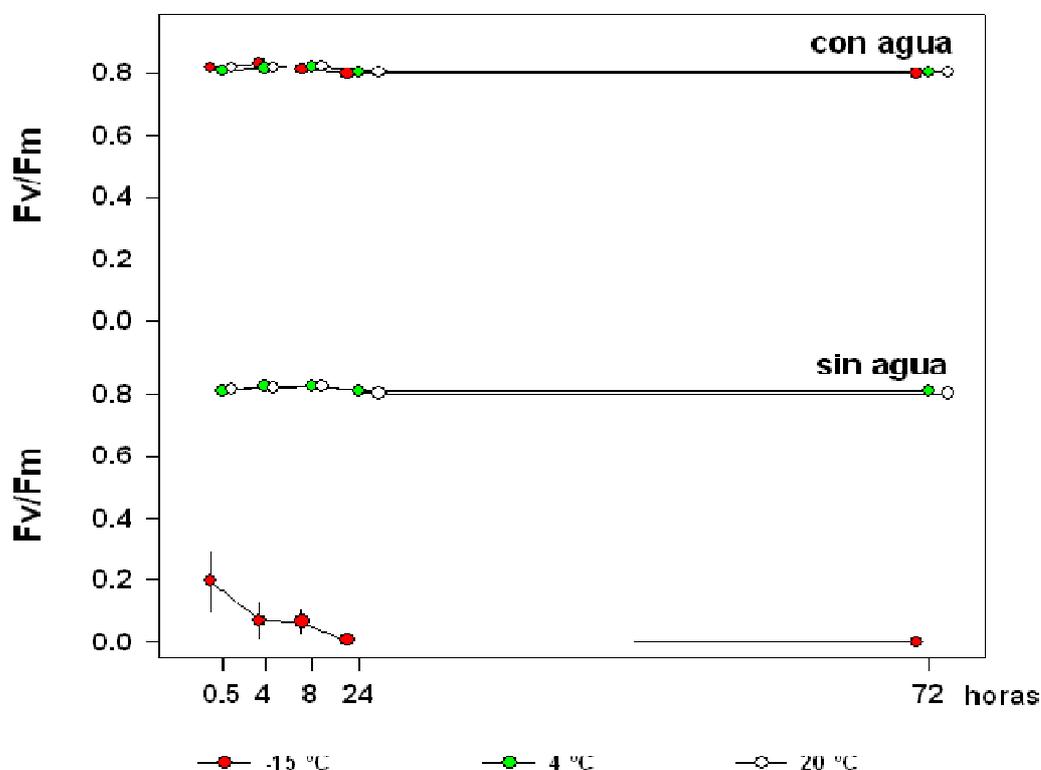
En este experimento se evaluó la resistencia de plantas de *Egeria densa* expuestas al efecto de tres factores en forma simultánea: i) baja temperatura del aire, ii) exposición directa al aire (*i.e.* plantas mantenidas en tubos Falcon sin agua), y iii) capacidad de recuperación o deterioro, posterior a la exposición. Este experimento se realizó en dos condiciones diferentes de tiempos de exposición (dos y cuatro horas).

Durante el desarrollo de este experimento, la temperatura del agua en los tubos Falcon expuestos a una temperatura del aire de 4 °C, varió entre 6.0 y 6.4 °C.

### **2 horas de exposición a condiciones experimentales**

Los resultados del experimento desarrollado con plantas expuestas a -15, 4 y 20 °C por dos horas se muestran en la Figura 31 y Tabla 8. Sólo las plantas expuestas directamente a una temperatura del aire de -15 °C (*i.e.* plantas en tubos Falcon sin agua), presentaron valores significativamente más bajos de Fv/Fm respecto al resto de las condiciones experimentales (Fig. 31) (prueba *a posteriori* de Tukey). Los valores de Fv/Fm de las plantas experimentales que fueron sometidas a -15 °C por dos horas fueron iguales a cero después de 24 y 72 horas (Fig. 31). Es importante señalar, que la superficie del agua contenida en los tubos Falcon a - 15 °C, se congeló luego de dos horas de exposición a esa temperatura.

### plantas expuestas por dos horas a tres temperaturas



**Figura 31.** Variabilidad de la relación Fv/Fm en plantas de Luchecillo luego de 0.5, 4, 8, 24 y 72 horas después de ser sometidas a -15, 4 y 20 °C por dos horas, con y sin agua (ver Materiales y Métodos).

**Tabla 8.** Resultados de ANDEVA de tres vías con medidas repetidas de los valores de la relación Fv/Fm en plantas de Luchecillo luego de 0.5, 4, 8, 24 y 72 horas después de ser sometidas a -15, 4 y 20 °C por dos horas, con y sin agua (ver Materiales y Métodos).

	grados de libertad	F	P
temperatura	2. 102	7382.6	< 0.001
presencia / ausencia de agua	1.102	7162.9	< 0.001
temperatura x presencia / ausencia de agua	2. 102	7385.8	< 0.001
tiempo	4.408	48.0	< 0.001
tiempo x temperatura	8. 408	27.3	< 0.001
tiempo x presencia / ausencia de agua	4. 408	19.1	< 0.001
tiempo x temperatura x presencia / ausencia de agua	8. 408	21.0	< 0.001

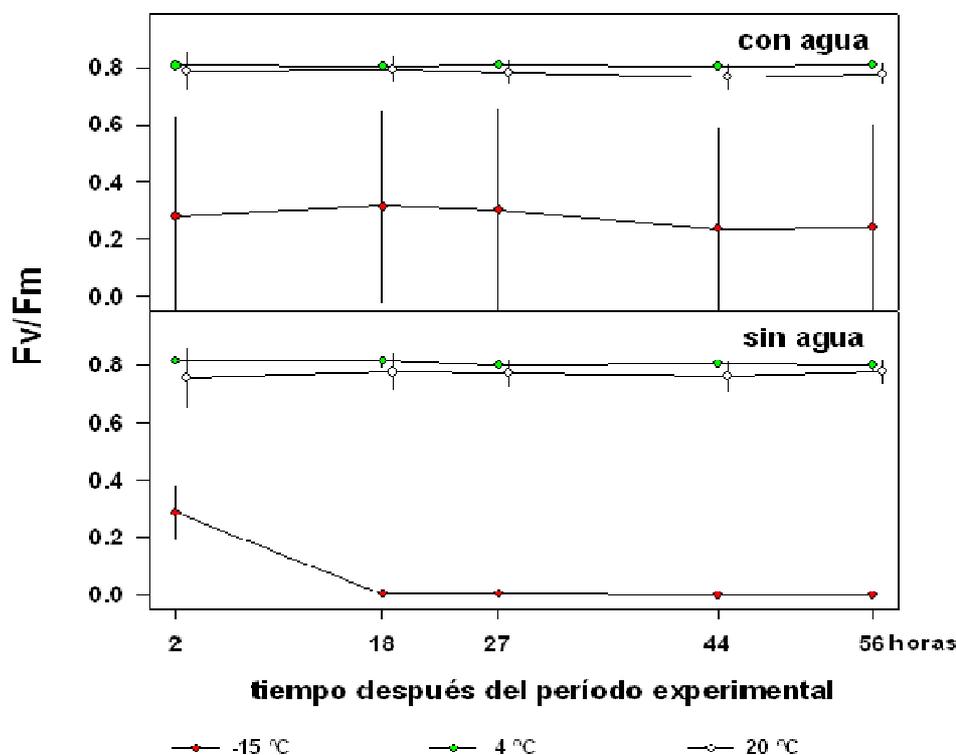
#### **4 horas de exposición a condiciones experimentales**

Los resultados del experimento desarrollado con plantas expuestas a -15, 4 y 20 °C por cuatro horas se muestran en la Figura 32 y Tabla 9. Se observó que las plantas expuestas indirectamente y directamente a una temperatura del aire de -15 °C (*i.e.* plantas en tubos Falcon con y sin agua, respectivamente), presentaron valores significativamente más bajos en sus proporciones de Fv/Fm respecto al resto de las temperaturas (Fig. 32) (prueba *a posteriori* de Tukey,).

La proporción Fv/Fm de las plantas mantenidas a -15 °C en tubos Falcon con agua no varió mayormente a través del experimento (promedio cercano a 0.25 para cada tiempo de medición), a la vez que la de las plantas expuestas al aire decreció abruptamente de 2 a 18 horas después del tiempo de exposición de cuatro horas (*ca.* 0.25 a 0 en el promedio de Fv/Fm) (Fig. 32).

Es importante señalar, que todo el volumen de agua contenido en los tubos Falcon donde se mantuvieron las plantas sometidas indirectamente a una temperatura del aire de -15 °C, se congeló luego de cuatro horas de exposición a esa temperatura.

### plantas expuestas por cuatro horas a tres temperaturas



**Figura 32.** Variabilidad de la relación  $F_v/F_m$  en plantas de Luchecillo luego de 2, 18, 27 44 y 56 horas después de ser sometidas a -15, 4 y 20 °C por cuatro horas, con y sin agua (ver Materiales y Métodos).

**Tabla 9.** Resultados de ANDEVA de tres vías con medidas repetidas de los valores de la relación  $F_v/F_m$  en plantas de Luchecillo luego de 2, 18, 27, 44 y 56 horas después de ser sometidas a -15, 4 y 20 °C por cuatro horas, con y sin agua (ver Materiales y Métodos).

	grados de libertad	F	P
temperatura	2.102	1231.630	< 0.001
presencia / ausencia de agua	1.102	41.368	< 0.001
temperatura x presencia / ausencia de agua	2.102	34.532	< 0.001
tiempo	4.408	2.513	0.041
tiempo x temperatura	8.408	2.268	0.022
tiempo x presencia / ausencia de agua	4.408	2.065	0.085
tiempo x temperatura x presencia / ausencia de agua	8.408	2.259	0.023

Los resultados del experimento 1 permiten concluir que las plantas de Luchecillo del área de estudio son capaces de soportar temperaturas de hasta  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un medio acuoso, sin que el valor  $F_v/F_m$ , indicador de funcionalidad del aparato fotosintético sea significativamente afectado. Sin embargo, hay que recalcar que las temperaturas experimentales del medio acuoso a que se expusieron las plantas, no representan la condición natural del área de estudio, ya que las temperaturas más bajas del agua en el área son de alrededor de  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (datos no publicados de EJ).

A su vez, los resultados del experimento 2 muestran que las plantas de *Egeria densa* pueden soportar temperaturas ambientales extremas (hasta  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el aire), por al menos dos horas sin presentar variaciones significativas en sus valores de  $F_v/F_m$ , siempre y cuando se encuentren inmersas dentro de un ambiente acuoso. Más aún, el análisis individual de los valores de  $F_v/F_m$  en aquellas plantas mantenidas por cuatro horas a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  en tubos Falcon con agua, muestra que un 33% del total de las plantas analizadas tuvieron valores considerados dentro de valores cercanos a los definidos como óptimos (Maxwell & Jonson 2000, Huner *et al.* 2003) (0.70-0.80), a la vez que en el resto de las plantas esos valores fueron cercanos a cero. Esto sugiere que existe una proporción de individuos más tolerantes a bajas temperaturas ( $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  en este estudio), mientras que otros son menos tolerantes, evidenciando deterioro ante similares condiciones extremas.

Los resultados anteriores y el hecho, de que el área del humedal con sedimentos expuestos al aire durante marea baja representa sólo una pequeña fracción del total de micro hábitats del borde del río donde ocurría *Egeria densa* con anterioridad al año 2004 (ver punto 3.4), permite rechazar la hipótesis de la UCh (Marín *et al.* 2008 a, b), que señala que la exposición y desecación de las plantas a bajas temperaturas del aire fue la causal de la desaparición de la misma en el área. Adicionalmente, aún cuando las plantas de las partes más someras de los bañados pudiesen haber quedado expuestas al aire, éstas en ningún momento habrían quedado en un ambiente seco, sino siempre recubiertas con una película de agua manteniendo un equilibrio entre la humedad de la planta y del aire. Esta situación habría mitigado cualquier eventual efecto de las heladas, cuya frecuencia e intensidad ha sido mayor en el período anterior al año 2004 (ver punto 3.4.).

## 7. CONCLUSIONES Y DISCUSION GENERAL

i) Los resultados de los análisis de datos históricos de temperatura mínima del aire, precipitaciones y caudal del río Cruces, demuestran que las tres condiciones propuestas por Marin *et al.* 2008 (a, b), como gatilladores del cambio de estado del humedal del río Cruces, es decir, la co-ocurrencia de tres eventos fríos, ausencia de precipitaciones y bajo caudal hídrico, no puede considerarse “anómala”, ya que los valores medidos para esas variables ambientales corresponden a valores comúnmente observados en la dinámica temporal de las mismas. En todos los casos y para el periodo estudiado, la ocurrencia de estos eventos es mayor al 5%, lo cual implica que no son eventos raros, sino parte del espectro de variabilidad que manifiestan los sistemas naturales. Más importante aún, y en acuerdo con la teoría de sistemas complejos (Bak *et al.* 1987; Bak 1996), los eventos extremos de pequeña magnitud dominan la distribución de frecuencias de las precipitaciones y el caudal del río Cruces (*i.e.*, son la moda), mientras que la ocurrencia de eventos de gran magnitud (lluvias intensas y alto caudal) ocurren a frecuencias menores. Sin embargo, todos estos eventos aportan proporcionalmente a la dinámica del sistema, proporcionalidad que es descrita por una relación de escalamiento (ecuación de potencia) de la forma  $f = M^b$  donde  $f$  es la frecuencia a la que ocurren eventos de magnitud  $M$  y  $b$  es el exponente de la relación. En general, la relación entre la frecuencia y magnitud de los eventos en un sistema complejo muestra altos ajustes estadísticos, caracterizados por coeficientes de determinación cercanos a 1 (*e.g.*, Fig. 19 b y 19 c), lo cual ha llevado a nombrar a estas relaciones como “leyes de potencia”, las cuales son útiles para describir el comportamiento dinámico de cuencas hidrográficas, procesos geológicos (Ley de Gutenberg-Richter de los terremotos) y otros sistemas complejos (Bak 1996). Nada de esta riqueza de comportamiento de la variabilidad ambiental fue explorada en el estudio de Marín *et al.* 2008 (a, b). Por el contrario, en ese estudio se redujo la complejidad natural a una versión simplista representada por condiciones de presencia-ausencia de un determinado patrón o fenómeno y de efectos positivos-negativos sobre *Egeria densa*.

ii) La temperatura mínima del aire presentó una distribución normal, centrada en torno a 4-5 °C y con una alta proporción de eventos de temperaturas bajo cero °C (16% de las observaciones). Ya que los eventos extremos en temperatura han sido extensivamente considerados como agentes de selección en la naturaleza (Hochachka & Somero 2002), es esperable que tengan efectos importantes sobre la sobrevivencia y desempeño de los organismos vivos. La alta ocurrencia de eventos de temperaturas bajo cero °C en el área del humedal del río Cruces, demuestra que *Egeria densa* ha estado comúnmente expuesta a estas presiones selectivas. Sin embargo, la alta cobertura y persistencia temporal de esta planta acuática, indican que la misma se desempeña adecuadamente, aún en presencia de estas condiciones extremas. De hecho, en este estudio se demuestra que la proporción  $F_v/F_m$  no cambió significativamente cuando se expusieron plantas a diferentes escenarios de bajas temperaturas en un medio acuoso. Esto sugiere que *Egeria densa* manifiesta una respuesta plástica (e.g. Pigliucci 2006), respondiendo positivamente a los valores de temperatura, que comúnmente están presentes en el área del humedal del río Cruces.

iii) La evidencia histórica sugiere que la hipótesis auxiliar propuesta para guiar el estudio de Marín *et al.* (2008 a, b) no se cumple, ya que asume que eventos fríos, bajas precipitaciones y bajo caudal en el río Cruces nunca habían co-ocurrido en periodos anteriores a Mayo del año 2004. Contrario a lo predicho, el análisis de los datos históricos muestra que la co-ocurrencia de estos eventos ha sido registrada en periodos previos al año 2004, y en términos de frecuencia e intensidad, ha sido más drástica y de mayor persistencia temporal que lo observado en Mayo del año 2004. Lo anterior permite establecer que, dado que estos eventos extremos han ocurrido a través de la historia del humedal del río Cruces, no puede argumentarse que estas mismas condiciones tuvieran efectos letales sobre la distribución, cobertura y persistencia de *Egeria densa* sólo durante Mayo del año 2004. Esto es importante ya que al parametrizar cualquier modelo lineal usando datos empíricos, los resultados del mismo deberían entregar predicciones similares (*i.e.*, ante iguales causas, iguales resultados). En este sentido sin embargo, es necesario ser parsimonioso y mantener una visión integradora, dado que en sistemas complejos como los humedales, la ocurrencia de

respuestas no-lineales ante la misma causa podría ser común. Estas respuestas no lineales son aún más esperables, cuando se argumenta que tres causas deben co-ocurrir simultáneamente (sin considerar una cuarta en relación al pulso de inundación), para explicar la ocurrencia de un fenómeno. Sin embargo, Marín *et al.* (2008 a, b) reducen este complejo escenario de posibles trayectorias a un solo efecto: la desaparición inicial de *Egeria densa* y el cambio de estado del humedal del río Cruces.

iv) El criterio de parsimonia que guía el proceso de investigación científica establece que aún cuando una cierta hipótesis sea aceptada, no elimina la validez de otras hipótesis alternativas aún no puestas a prueba y que den cuenta del mismo fenómeno sin invocar factores más complejos; es decir, si dos hipótesis explican igualmente bien un fenómeno siempre debe darse preferencia a aquella que sea más simple y que tenga menos supuestos. Consideramos que la hipótesis postulada por Marín *et al.* 2008 (a, b), tiene demasiados supuestos, los cuales carecen de sustento empírico, y por lo tanto no se ajusta al criterio de parsimonia.

v) Lo anterior reafirma la necesidad de estudios ecosistémicos en el humedal, basados en hipótesis claras, apropiadamente fundamentadas y que integren de manera sistemática a los diferentes componentes del humedal del río Cruces y cauces tributarios. Esta necesidad esta expresada en el “Programa de Investigaciones en el Ámbito Ecosistémico”, que fue elaborado por investigadores de diversas disciplinas y pertenecientes a la Universidad Austral de Chile, Universidad Santo Tomás, Universidad de Concepción, Universidad Nacional de Luján (Argentina) y el Institut of Environmental Research Leipzig / Halle, Magdeburg (UFZ, Alemania), entre otros. Este Programa fue diseñado a solicitud de CONAF y entregado en Junio del año 2006 y forma parte del PIGA (Plan Integral de Gestión Ambiental del Humedal del río Cruces (véase Resumen Ejecutivo<sup>2</sup>). Los profesionales que participaron en la elaboración del PIGA, consideraron explícitamente la necesidad de elaborar un modelo conceptual del ecosistema del río Cruces, que sirviera como plataforma de integración entre los diferentes componentes ecosistémicos. Por lo tanto, una perspectiva integradora no es

---

<sup>2</sup> [www.conaf.cl/?page=home/contents&seccion\\_id=3b82c881b851cdb33cbcf0400bf9fa2&unidad=0&](http://www.conaf.cl/?page=home/contents&seccion_id=3b82c881b851cdb33cbcf0400bf9fa2&unidad=0&)

una idea original del Informe Final de la UCh (Marín *et al.* 2008 b) sino que sólo se ajusta a los requerimientos establecidos en el PIGA. Es lamentable entonces que la elaboración del modelo conceptual del ecosistema del humedal del río Cruces descrito en el informe Final de la UCh (Marín *et al.* 2008 b), se usará como plataforma para elevar críticas a la forma de trabajar en las especialidades consideradas en el Programa de Investigaciones en el Ámbito Ecosistémico.

Consideramos que una visión integradora del funcionamiento del humedal del río Cruces, sólo emergerá cuando la modelación participativa y sus interpretaciones sean contrastados con los hechos observados y con la recopilación sistemática de información por especialistas del ámbito ecosistémico y con convergencia de interpretaciones, lo que permitirá avanzar en forma armónica como sociedad para fomentar las acciones tendientes a promover el desarrollo sustentable de la cuenca del río Cruces y sus cauces tributarios.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aceituno, P. 2008. Boletín Climático. Departamento de Geofísica, FCFM, Universidad de Chile.

An, H. & Shangquan, Z.P. 2008. Specific leaf area, leaf nitrogen content, and photosynthetic acclimation of *Trifolium repens* L. seedlings grown at different irradiances and nitrogen concentrations. *Photosynthetica* 46: 143-147.

Bak, P. 1996. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York, Copernicus.

Bak, P., Tang, C. & Wiesenfeld, K. 1987. "Self-organized criticality: an explanation of 1 / f noise". *Physical Review Letters* 59: 381- 384.

Barrientos, S.E. & Ward, S.N. 1990. The 1960 Chile earthquake: coseismic slip from surface deformation. *Geophysical Journal International* 103: 589-598.

Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N. & Smith, V.H. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8: 559-568.

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

Cifuentes, I.L. 1989. The 1960 Chilean earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 517: 665-680.

Corti, P. & Schlatter, R. 2002. Feeding ecology of the Black-necked swan *Cygnus melancoryphus* in two wetlands of Southern Chile. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 37: 9-14.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutttonkk, P. & Van den Belt., M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.

Engelhardt, K. & Ritchie, M. 2001. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. *Nature* 411: 687-689.

Euliss, N., LaBaugh, J., Fredrickson, L., Mushet, D., Laubhan, M., Swanson, G., Winter, T., Rosenberry, D. & Nelson, R. 2004. The wetland continuum: a conceptual framework for interpreting biological studies. *Wetlands* 24: 448-458.

Gaudet, C.L. & Keddy, P.A. 1995. Competitive performance and species distribution in shoreline plant communities: a comparative approach. *Ecology* 76: 280-291.

Haramoto, T. & Ikusima, I. 1998. Life cycle of *Egeria densa* Planch., an aquatic plant naturalized in Japan. *Aquatic Botany* 30: 389-403.

Hochachka, P.W. & Somero, G.N. 2002. Biochemical adaptation: mechanism and process in physiological evolution. Oxford; New York : Oxford University Press.

Huber, A. 1970. Diez años de observaciones climatológicas en la Estación Teja-Valdivia (Chile) 1960-1969. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas 46 p.

Huner, NPA., Oquist, G. & Melis, A. 2003. Photostasis in plants, green algae and cyanobacteria: the role of light harvesting antenna complexes. In: Green BR, Parson WW (eds) *Advances in Photosynthesis and Respiration Light Harvesting Antennas in Photosynthesis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 401-421.

Jaksic, F. 2004. El Niño effects on avian ecology: lesson learned from the southeastern Pacific. *Ornitología Neotropical* 15: 61-72.

Jaramillo, E., Schlatter, R., Contreras, H., Duarte, C., Lagos, N., Paredes, E., Ulloa, J., Valenzuela, G., Peruzzo, B. & Silva, R. 1987. Emigration and mortality of Black-necked swans (*Cygnus melancorypphus*) and disappearance of the macrophyte *Egeria densa* in a Ramsar wetland site of southern Chile. *Ambio* 36: 607-609.

- Kahara, S.N. & Vermaat, J.E. 2003. The effects of alkalinity on photosynthesis-light curves and inorganic carbon extraction capacity of freshwater macrophytes. *Aquatic Botany* 75: 217-227.
- Kautsky, H. & Hirsch, A. 1931. Neue Versuche zur Kohlensaureassimilation. *Naturwissenschaften* 19: 964.
- Koeppel, C., & de Long, G. 1958. *Weather and Climate*. McGraw-Hill Company, Inc. New York, Toronto, London. 341 p.
- Krause, G. & Weis, E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annual Review Plant Molecular Biology* 42: 313-349.
- Lagos, N.A., Paolini, P., Jaramillo, E., Lovengreen, C., Contreras, H. & Duarte, C. 2008 a. Environmental processes, water quality and decline of waterbird populations in the Río Cruces Ramsar wetland. *Wetlands* 28 (4): en prensa.
- Lagos, N.A., Broitman, B. & Castilla, J.C. 2008 b. Environmental spatial correlates of intertidal recruitment: a test using barnacles in northern Chile. *Ecological Monographs* 78: 245-261.
- Lara, M., Casati, P. & Andreo, C. 2002. CO<sub>2</sub>-concentrating mechanisms in *Egeria densa*, a submersed aquatic plant. *Physiologia Plantarum* 115: 487-495.
- Larcher, W. 2003. *Physiological Plant Ecology; Ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Fourth Edition. Springer Verlag, Berlin Heidelberg. New York. 513 p.
- Leonard, L. & Luther, M. 1995. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography* 40: 1474-1484.
- Marín *et al.* 2008 a. Segundo Informe de Avance (Marzo 2008) "Elaboración de un modelo conceptual del ecosistema del humedal del río Cruces". Corporación Nacional Forestal y Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. ID 633-111-LP07.
- Marín *et al.* 2008 b. Informe Final (Abril 2008) "Elaboración de un modelo conceptual del ecosistema del humedal del río Cruces". Corporación Nacional Forestal y Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. ID 633-111-LP07.
- Maxwell, K. & Johnson, G. 2000. Chlorophyll fluorescent a practical guide. *Journal of Experimental Botany* 51: 659-668.
- Mohammed, G.H., Binder, W.D. & Gillies, S.L. 1995. Chlorophyll fluorescence - a review of its practical forestry applications and instrumentation. *Scandinavian Journal Forestry Research* 10: 383-410.

Oldham, C.E. & Sturman, J. 2001. The effect of emergent vegetation on convective flushing in shallow wetlands: experiments and scaling. *Limnology and Oceanography* 46:1486-1493.

Palma, A., Silva, M., Muñoz, C., Cartes, C. & Jaksic, F. 2008. Effect of prolonged exposition to mill pulp effluent on the invasive aquatic plant *Egeria densa* and other primary producers: a mesocosm approach. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27: 387-396.

Pigliucci, M. 2006. Jack of all trades, master of some ? On the role of phenotypic plasticity in plant invasions. *Ecology Letters* 9: 981-993

Perillo, G. & Piccolo, C. 1991. Interpolation method for estuarine and oceanographic data. *Computers & Geosciences* 17: 813-820.

Perillo, G., Piccolo, C. & Pino, M. (Eds.). 1999. *Estuaries of South America: their Geomorphology and Dynamics*. Environmental Science Series. Springer Verlag, Berlín. 223 p.

Pethick, J. 1984. *An introduction to coastal geomorphology*. 1982. Edward Arnold Publicaton, London, 272 p.

Pino, M., Perillo, G.M. & Santamarina, P. 1994. Residual fluxes in a cross section in the Valdivia river estuary, Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* 38: 491-505.

Pino, M. 1995. Structural Estuaries. In G. Perillo (Ed.) *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, Elsevier: 227-239.

Pinochet, D., Ramírez, C., MacDonald, R. & Riedel, L. 2004. Concentraciones de elementos minerales en *Egeria densa* Planch, colectada en el santuario de la naturaleza Carlos Anwandter, Valdivia, Chile. *Agro Sur (Chile)* 32: 80-86.

Plafker, G. & Savage, J.C. 1970. Mechanism of the Chilean earthquakes of May 21 and 22, 1960, *Geological Society of America Bulletin* 81: 1001-1030.

Rapacz, M. 2007. Chlorophyll a fluorescence transient during freezing and recovery in winter wheat. *Photosynthetica* 45: 409-418.

Rizza, F., Pagani, D., Stanca, M. & Cattivelli, L. 2001. Use of chlorophyll fluorescence to evaluate the cold acclimation and freezing tolerance of winter and oats. *Plant Breeding* 120: 389-396.

Rojas, C. 2002. Zonificación y evaluación de áreas de amenaza de inundación en la ciudad de Valdivia. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias mención en Recursos Hídricos. Escuela de Graduados. Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile. 246 p.

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

Rojas, C. 2005. El rol de los paleocauces y humedales en la evaluación de las amenazas naturales en la ciudad de Valdivia. *Revista Geográfica de Valparaíso* 35: 243-251.

Rojas, P. 2007. Estudio del efecto del anegamiento prolongado en las especies *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst, *Nothofagus nitida* (Phil.) Krasser y *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 35 pp.

Rojas, C. & Mardones, M. 2003. Las inundaciones en la ciudad de Valdivia: eventos históricos 1899 - 2002. *Revista Geográfica de Valparaíso* 34: 227-242.

Rose, C. & Crumpton, W. 1996. Effects of emergent macrophytes on dissolved oxygen dynamics in a prairie pothole wetland. *Wetlands* 16: 495-502.

Saint-Amand, P. 1963. The great earthquakes of May 1960 in Chile, *Smithsonian Report for 1962*, Smithsonian Institution, Washington, D.C. 337-363.

San Martín, C., Contreras, D. & Ramírez, C. 2000. El recurso vegetal del santuario de la naturaleza "Carlos Anwandter" (Valdivia, Chile). *Revista Geográfica de Valparaíso* 31: 225-235.

Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Thome, K.J. & Barker, J.L. 2007. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain. *Remote Sensing of Environment* 110: 393-409.

UACH (2005). Estudio sobre origen de mortalidades y disminución poblacional de aves acuáticas en el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter, en la Provincia de Valdivia. Informe Final. UACH - CONAMA X Región. Convenio complementario específico nº 1210-1203/2004. 539 p.

UACH (2007). Informe histopatológico y toxicológico de aves acuáticas recepcionadas en la Universidad Austral de Chile durante el año 2007. 27 p.

Walker, B. & Meyers, J.A. 2004. Thresholds in ecological and social-ecological systems: a developing database. *Ecology and Society* 9: 3. (online) URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art3>

Weiher, E., Wisheu, I., Keddy, P. & Moore, D. 1996. Establishment, persistence, and management implications of experimental wetland plant communities. *Wetlands* 16: 208-218.

Wilson, S.D. & Keddy, P. 1986. Species competitive ability and position along a natural stress/disturbance gradient. *Ecology* 67: 1236-1242.

*UACH 2008: Factores ambientales en humedal del río Cruces y tolerancia térmica del Luchecillo.*

Zúñiga, R., Alberdi, M., Reyes-Díaz, M., Olivares, E., Hess, S., Bravo, L.A. & Corchera, L.J. 2006. Seasonal changes in xanthophyll composition and photosynthetic performance in leaves of two evergreen *Nothofagus* species growing under Mediterranean-Humid climate in south central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 79: 489-504.

## 9. INVESTIGADORES PARTICIPANTES

### Universidad Austral de Chile:

- Dr. Eduardo Jaramillo (ecología acuática) (Instituto de Ecología y Evolución).  
Coordinador del estudio.
- Dr. Anton Huber (climatología) (Instituto de Geociencias).
- Dr. Alejandra Zúñiga (fisiología vegetal) (Instituto de Geociencias).
- Dr. Mauricio Soto (fisiología animal) (Instituto de Ecología y Evolución).
- Dr. Mario Pino (sedimentología e hidrodinámica estuarial) (Instituto de Geociencias).
- Dr. Heraldo Contreras (análisis de datos) (asociado al laboratorio de E Jaramillo).
- Ing. Forestal Mabel Delgado (experimentos de tolerancia de Luchecillo) (asociada al laboratorio de A. Zúñiga).
- Dr. Bruno Peruzzo (microscopía electrónica de barrido) (Instituto de Histología y Patología).
- Ing. Electrónico Ricardo Silva (microscopía electrónica de barrido) (Instituto de Histología y Patología).

### Universidad Santo Tomás, Santiago:

- Dr. Nelson Lagos (ecología acuática y análisis estadísticos de variables ambientales) (Departamento de Ciencias Básicas).