

## MODELIZACIÓN TERMODINÁMICA DE ESTANQUES PARA PISCICULTURA

**Mareva Yamile Gutierrez Sosa**, UTN-FRRe-GITEA, mareygs@gmail.com

**Ruben Spotorno**, UTN-FRRe-GITEA, rubenspotorno@yahoo.com

**Juan Jose Pochettino**, UTN-FRRe-GITEA, pochettinojuan@hotmail.com

**Hugo Zurlo**, UTN-FRRe-GITEA, hzurlo@gmail.com

**Gustavo Raul Figueredo**, UTN-FRRe-GITEA, grfigueredo@gmail.com

**Resumen**— La evaporación es un fenómeno relevante que influye en la temperatura del agua de piscinas, estanques, lagunas y reservorios de agua en general. Esta variación de temperatura puede resultar en un impacto positivo o negativo en el régimen productivo de la piscicultura.

Se presenta la modelización termodinámica del comportamiento diario de un volumen de agua expuesto en su superficie libre a las condiciones atmosféricas en el que el fenómeno de evaporación es relevante. En la modelización se efectúa el balance energético suponiendo que durante un periodo de 15 min, excepto la temperatura del agua, los demás parámetros se mantienen constantes. Los flujos de energía evaluados son la radiación solar, el flujo de calor por convección y el flujo de agua evaporada. Para el flujo de agua evaporada se analizó la ecuación del “Lago Hefner” y la ecuación de Harbeck. El modelo fue desarrollado para predecir la temperatura del agua de estanques para piscicultura en función de las variables climáticas y de las características físicas del estanque.

Se compararon los valores experimentales con los obtenidos teóricamente; se ajustaron las constantes del modelo y se obtuvo una buena correlación entre la temperatura que predice el modelo y la determinada experimentalmente. Se utiliza el modelo para predecir la temperatura de estanques destinados a piscicultura.

**Palabras clave**—*tasa de evaporación, modelización termodinámica, estanques piscicultura.*

### 1. Introducción

La evaporación es un fenómeno estudiado globalmente desde principios de 1900, siendo la temperatura del aire ambiente, la humedad relativa en el aire, la temperatura del agua y la velocidad del viento los principales factores que rigen la tasa de evaporación. Se han llevado a cabo experimentos en océanos, ríos, piscinas y otros cuerpos de agua para estudiar la evaporación a mayores escalas. En embalses destinados a riego, la evaporación implica una pérdida importante de agua. Penmann [1] propuso una correlación empírica, en función de una gran cantidad de datos experimentales, para la tasa de evaporación en presencia de viento que es muy utilizada y conocida.

La principal restricción económica en las actividades invernales de un estanque de cultivo de peces es la necesidad de realizar operaciones en un estanque cubierto para mantener las temperaturas adecuadas del agua. Hasta el presente, pocos autores han informado sobre el modelado térmico de un estanque de invernadero de piscicultura para predecir la temperatura del estanque durante todo el año. Klemestson y Rogers [2] probaron un estanque de refugio de invernadero o plástico que podría lograr un aumento de 2,8-4,4°C en la temperatura del agua de cada mes del año en comparación con un estanque al aire libre. Zhu [3] reportó que un sistema de estanques de invernadero puede lograr una mejora de 5,2°C en la temperatura del agua de un estanque de 1 m de profundidad, en comparación con la temperatura del aire exterior. Se desarrolló un modelo de sistemas de estanques de invernadero (SEI) y describe la evolución de varios flujos de transferencia de calor y vapor de agua, temperatura y humedad, bajo diversas condiciones climáticas. Los resultados de la simulación muestran que, en un estanque de 1 m, un SEI de polietileno puede producir un aumento de 5,2 ° C en la temperatura del agua en comparación con la temperatura del aire exterior. Las principales pérdidas de calor del agua en el SEI son: la radiación térmica a la cubierta, la convección desde la cubierta hacia el aire exterior y la radiación térmica. La reducción de estas tres densidades de flujo de calor es la principal medida para mantener la temperatura del agua o ahorrar energía en un SEI.

En años recientes, la cría de peces de agua dulce en estanques poco profundos fue llevada a cabo en el norte de India. En la temporada de invierno la temperatura ambiente en dicha región cae por debajo de los 10°C. Debido a las más bajas temperaturas del agua del estanque en esta estación, la mortalidad de peces aumenta, puede haber una mortalidad abundante y una gran reducción en la producción. La buena salud de los peces y la tasa de producción son funciones de la temperatura del agua del estanque. Dilip Jain [4] presentó un modelo analítico transitorio de la eficiencia de un invernadero para calentamiento de un estanque para piscicultura. Los estudios paramétricos involucraron los efectos de longitud, ancho, profundidad e inclinación del revestimiento del estanque de peces. El rendimiento del estanque de peces se evaluó en términos de ganancia de temperatura, eficiencia térmica media y nivelación de la carga térmica. Los parámetros óptimos para el estanque de peces fueron de 30 m de longitud, 16m de ancho, 1,25m de profundidad, 1m profundidad del agua y 8 cambios de aire por hora para obtener la máxima ganancia de temperatura, y mínima carga térmica.

Se presentan los resultados experimentales de la masa de agua evaporada y temperatura del agua en función de las variables meteorológicas; se efectúa el cálculo de la tasa de evaporación y se simula la temperatura de las bandejas de las experiencias. Se ajusta el modelo y se simula la temperatura de un estanque destinado a piscicultura. En vista de esto, el objetivo de nuestro estudio consistió en construir un modelo para predecir la temperatura de estanques destinados a piscicultura y estudiar los efectos de diferentes parámetros en la evaporación del agua.

## **2. Materiales y Métodos**

El fenómeno que más influye en la temperatura del agua de un estanque o de una piscina es la evaporación. Es por esto que se realizaron determinaciones experimentales: de la masa de agua evaporada de un recipiente expuesto a la atmósfera, de las condiciones meteorológicas y de la temperatura del agua, para posteriormente extrapolar los resultados a un estanque.

Se realizaron ensayos en los cuales se utilizaron dos bandejas plásticas de dimensiones aproximadamente iguales, un área de  $1000\text{cm}^2$  y una profundidad de 12cm, ambas expuestas a las condiciones ambientales, con un índice metálico indicando un nivel de referencia y en las que se introdujo un sensor de temperatura tipo Pt100.

Al inicio de cada experiencia se tomaba registro de la hora de inicio en la cual se cargaban las bandejas con agua potable hasta un nivel de referencia. Durante las mismas se efectuaba una medición de las temperaturas cada 15 minutos por medio de sensores Pt100 conectados a un sistema de adquisición de datos. Al finalizar la experiencia, se rellenaba a nivel el agua evaporada utilizando una probeta graduada y se registraba la hora de finalización.

Para los cálculos experimentales se contaba como dato con el volumen agregado de agua por reposición. Al dividir este volumen por el área superficial de las bandejas se obtuvo los milímetros evaporados. Para tener el resultado final en milímetros evaporados por día, se dividieron los milímetros evaporados por la cantidad de días que duró la experiencia.

Para los cálculos de la tasa de evaporación teórica se seleccionaron dos ecuaciones empíricas que a priori dieron mejores resultados, dentro de la gran variedad de ecuaciones disponibles, todas son función del déficit de presión de vapor DPV: La del lago Heffner y la de Harbeck las cuales, en general, incluyen las variables siguientes: velocidad del viento, déficit de presión de vapor y área superficial de las bandejas. La ecuación del lago Heffner (1) es de origen empírica [5] y da la tasa de evaporación en (m/s) en función de una relación lineal con ordenada al origen de la velocidad del viento:

$$E = (0,068 + 0,13V) 1,344 \times 10^{-7} DPV \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

La nomenclatura detallada de las variables usadas en la deducción se enmuran detalladamente, acompañadas de sus respectivas unidades, en el apéndice del presente trabajo. También se evaluó la llamada ecuación de Harbeck [6] que considera el efecto del área del estanque y una dependencia directa del flujo de agua evaporada con la velocidad del viento:

$$E = 2,909 A^{0,05} V DPV \left[ \frac{mm}{dia} \right] \quad (2)$$

$$DPV = e_s - e_a \quad (3)$$

La presión de vapor de agua saturado se calculó en función de la temperatura del agua mediante la siguiente expresión:

$$e_s = 1,17865 \times 10^{-16} [T + 105,78]^{7,76258} \quad (4)$$

La presión parcial del vapor en la atmósfera se calculó en función de la temperatura del aire y su humedad relativa mediante la siguiente expresión:

$$e_a = 1,17865 \times 10^{-16} [T_{air} + 105,78]^{7,76258} \left[ \frac{\varphi_{air}}{100} \right] \quad (5)$$

Para la determinación de la temperatura del agua en las bandejas se realizaron mediciones cada 15 minutos mediante un sistema de adquisición de datos de 6,5 dígitos de la marca Rigol. En cuanto a la medición de la temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento se realizaron mediciones cada 10 minutos mediante una estación meteorológica modelo Vantage PRO2 de la marca Davis que incluye: pluviómetro, anemómetro y sensores de temperatura, humedad y radiación solar. Para mejor precisión, los sensores de humedad y temperatura estuvieron ubicados en su correspondiente abrigo meteorológico.

Balance térmico:

Se desarrolló un modelo termodinámico simple que describe los cambios en la energía interna para los estanques de acuicultura al aire libre [7]. Suponiendo despreciables los flujos de energía relacionados con las filtraciones de agua hacia las napas subterráneas, los originados en las lluvias, en los desbordamientos de agua, y los relacionados al agua de reposición, la conservación de la energía en estado transitorio estará dada por:

$$\left(\frac{dU}{dt}\right) = q_{rad} - q_{evap} \pm q_{fondo} \pm q_{conv} \quad (6)$$

La energía interna dentro del volumen de control está dado por:

$$U = m_w C T \quad (7)$$

En el modelo la masa de agua se considera constante a pesar de la evaporación. También se asume que la densidad y el calor específico se mantienen constantes con la temperatura, ya que las variaciones de estas con cambios en la temperatura son despreciables.

La energía aportada por la radiación solar se midió directamente y el flujo de energía hacia el cielo nocturno se calculó considerando al cielo como un cuerpo negro a una temperatura de cielo equivalente. Según Duffie [8] la temperatura de cielo equivalente se puede aproximar por

$$T_S = T_{air}(0,711 + 0,00056T_{DP} + 0,00056T_{DP}^2 + 0,013Cos(15hs))^{0,25} \quad (8)$$

y la radiación neta hacia el cielo durante las horas nocturnas se calculó con la siguiente ecuación:

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T^4 - T_S^4) \quad (9)$$

La transferencia de calor a través de la convección fue calculada usando las leyes de Newton de enfriamiento:

$$q_{conv} = h_{air} * A(T - T_{air}) \quad (10)$$

El coeficiente de transferencia de calor en función de la velocidad del viento se determinó con la siguiente expresión, para velocidades del viento inferiores a 7m/s [9], [10].

$$h_{air} = 2,8 + 3,0V \quad (11)$$

Para la transferencia de calor por las paredes de la cuba se procedió su cálculo por la siguiente ecuación:

$$q_{fondo} = \frac{1}{R_t} * A(T - T_{air}) \quad (12)$$

$$R_t = \frac{1}{h_{agua}} + \frac{\lambda}{e} + \frac{1}{h_{air}} \quad (13)$$

Para el agua en convección natural el coeficiente de convección se encuentra entre 100 y 1000 W/m<sup>2</sup>. Para el caso de las bandejas que están construidas con PVC, el coeficiente de transmisión viene dado por la conductividad térmica  $\lambda$  que es igual a 0,17 W/m°C y el espesor que es de 0,003m.

El siguiente paso consistió en determinar la temperatura final del agua, sabiendo que:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\Sigma q}{m_w C} \quad (14)$$

Reemplazando  $\Sigma q$ , queda:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{-A(T_w - T_{air})(h_{air} + \frac{1}{R_t}) + q_{rad} - q_{evap}}{m_w C} \quad (15)$$

Llamaremos por simplicidad

$$h_g = h_{air} + \frac{1}{R_t} \quad (16)$$

Cálculo del calor perdido por evaporación

La determinación de la tasa de evaporación diaria para una superficie de agua se ha determinado por la ecuación de Harbeck.

$$E = 2,909 * A^{-0,05} * V(e_s - e_a) \quad (17)$$

La energía asociada a la evaporación está relacionada con la entalpia de vaporización, la densidad y el volumen de agua evaporado es

$$q_{evap} = r \rho A k_2 E \quad (18)$$

Reemplazando la tasa de evaporación en la energía asociada a la evaporación

$$q_{evap} = r \rho A k_2 * \left(\frac{A}{k_1}\right)^{-0,05} * V(e_s - e_a) \quad (19)$$

Donde se introdujo el coeficiente  $k_1$  para adimensionalizar el área de la ecuación de la tasa de evaporación que se encuentra elevada a un exponente decimal

$$k_1 = 1m^2 \quad (20)$$

y donde también se introdujo la constante  $k_2$  para homogeneizar las unidades de la tasa de evaporación en el sistema internacional de unidades y englobar a la constante de la ecuación de Harbeck

$$k_2 = 2,909 \frac{mm}{dia} \frac{s}{m \cdot kPa} \cdot \frac{1m}{1000mm} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{(24 \times 3600)s} \cdot \frac{1 \text{ kPa}}{1000Pa} = 3,367 \times 10^{-11} Pa^{-1} \quad (21)$$

La presión de vapor es una función complicada de la temperatura, lo que dificultaría mucho la obtención de una integral por medios analíticos, por eso se decidió aproximar la presión de vapor con una función lineal de la temperatura, que para los rangos de temperatura con los que se trabaja da un resultado aceptable.

$$e_s = k_3 T_w - k_4 \quad (22)$$

$$k_3 = 189,5 \frac{Pa}{^\circ C} \quad (23)$$

$$k_4 = 1517,6 Pa \quad (24)$$

Separando variables para plantear la integral

$$\frac{dT_w}{\left[-A(T_w - T_{air})h_g + q_{rad} - r\rho k_2 \left(\frac{A}{k_1}\right)^{-0,05} * V(k_3 T_w - k_4 - e_a)A\right]} = \frac{dt}{m_w c} \quad (25)$$

$$\frac{dT_w}{T_w a + b} = \frac{dt}{m_w c} \quad (26)$$

Donde se introdujeron dos variables auxiliares a los efectos de simplificar la escritura de la ecuación.

$$a = \left(-Ah_g - r\rho Ak_2 \left(\frac{A}{k_1}\right)^{-0,05} V k_3\right) \quad (27)$$

$$b = T_{air} Ah_g + q_{rad} - r\rho Ak_2 \left(\frac{A}{k_1}\right)^{-0,05} V(k_4 + e_a) \quad (28)$$

Reemplazando y planteando la integral definida entre una  $T_{inicial}$  y  $T_{final}$  y entre 0 y  $\tau$ :

$$\int_{T_i}^{T_f} \frac{dT_w}{a \cdot T_w + b} = \int_0^{\tau} \frac{dt}{m_w c} \quad (29)$$

Resolviendo la integral, aplicando propiedades de logaritmos y despejando la temperatura al final de un periodo  $\tau$

$$T_f = \frac{\left[ e^{\frac{\tau \cdot a}{m_w \cdot c} \cdot (a T_i + b)} \right] - b}{a} = \left[ e^{\frac{\tau \cdot a}{m_w \cdot c} \cdot \left(T_i + \frac{b}{a}\right)} \right] - \frac{b}{a} \quad (30)$$

Definiendo a la temperatura que alcanzaría el estanque en tiempo infinito cuando se alcance el régimen permanente:

$$T_{\infty} = \frac{-b}{a} \quad (31)$$

$$T_f = T_{\infty} - e^{\frac{\tau \cdot a}{m_w \cdot c}} (T_{\infty} - T_i) \quad (32)$$

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Tasa de evaporación

La tasa de evaporación se define como el caudal de agua que se evapora desde un estanque o un embalse hacia la atmosfera. Se acostumbra expresar dicho caudal en unidades de longitud correspondiente a la profundidad del estanque por cada día, típicamente en mm por cada día. Dicha tasa de evaporación depende fundamentalmente del déficit de presiones de vapor, entendiéndose como tal a la presión del vapor de agua a la temperatura del estanque menos la presión parcial del vapor de agua del aire húmedo atmosférico. En segunda instancia depende también de la velocidad del viento sobre el estanque, que ayuda a remover el agua evaporada y a renovar el aire atmosférico en contacto con la superficie del estanque; además de producir olas en la superficie que facilitan el intercambio de materia entre la fase líquida y la fase gaseosa. La presión de vapor del estanque es función de la temperatura del agua la que a su vez es función de la evaporación, de la radiación solar incidente y de las pérdidas de calor del estanque hacia el medio. La presión parcial del vapor de agua en el aire atmosférico depende a su vez de la temperatura ambiente y de la humedad relativa.

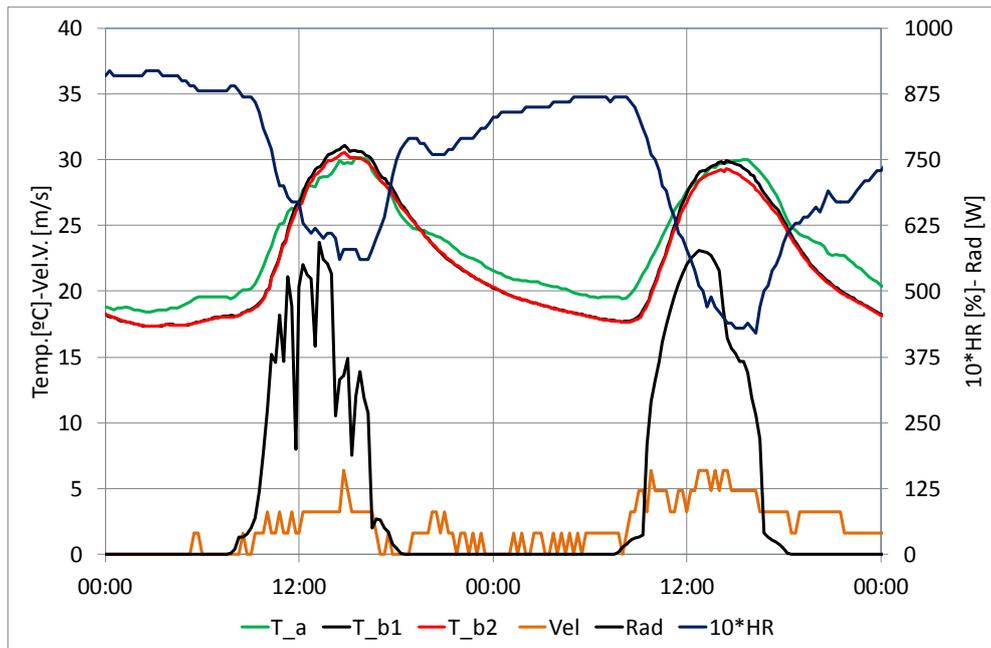


Figura 1. Temperaturas ambiente y de las bandejas, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa, de la experiencia N°6.

Fuente: elaboración propia

En la figura 1 se aprecia la evolución de la temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa medidos mediante la estación meteorológica durante una de las experiencias efectuadas. Dichos parámetros meteorológicos son los datos necesarios para calcular la tasa de evaporación mediante algunos de los modelos expuestos previamente. Se superponen, además en el gráfico, las temperaturas del agua de las 2 bandejas que se usaron para medir la tasa de evaporación. Del análisis de las gráficas de las distintas experiencias se observa que la temperatura del agua durante la noche desciende por debajo de la temperatura ambiente y que durante las horas diurnas se mantiene a aproximadamente igual o levemente por encima de la temperatura ambiente.

En función de los parámetros meteorológicos y de las temperaturas del agua de las bandejas se calcularon, aplicando las ecuaciones antes expuestas, las tasas de evaporación para cada periodo de tiempo por cada bandeja. En la figura 2 se representaron dichas tasas de evaporación en función del tiempo. Las oscilaciones que se observan tienen relación con las variaciones en la velocidad del viento que es determinante para la tasa de evaporación. Se observa una leve diferencia entre las tasas de evaporación de las 2 bandejas originadas en que existe una pequeña diferencia en la temperatura del agua. Si bien la tasa de evaporación de Harbeck se acerca a los 40mm/día a las 14hs del segundo día de la experiencia N°6 el valor medio es de cerca de 5,1mm/día. Las tasas de evaporación calculadas según Heffner son inferiores a las de Harbeck y para dicha experiencia es de aproximadamente 3,9mm/día.

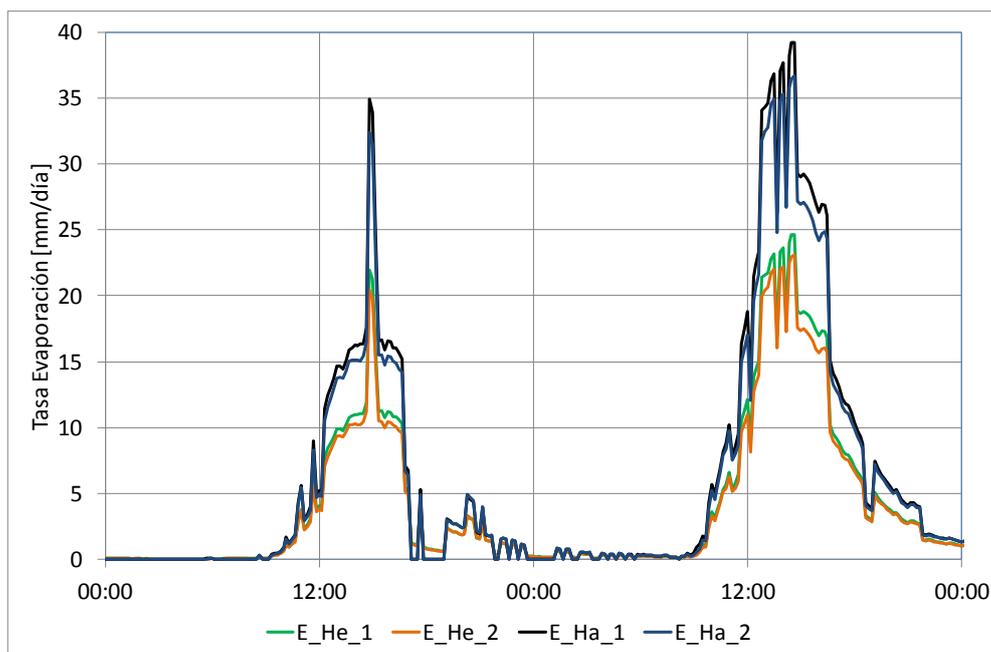


Figura 2. Tasas de evaporación de Heffner y Harbeck para cada una de las bandejas durante la experiencia N°6.

Fuente: elaboración propia

En la tabla 1 se resumen las principales características de una parte de las experiencias efectuadas. Se exponen la duración de la experiencia en días, las temperaturas máximas y mínimas durante las experiencias, la humedad relativa media, la velocidad del viento medias, las tasas de evaporación promedio según Harbeck y Heffner y la tasa de evaporación determinada experimentalmente mediante las experiencias con las bandejas. Se observa que en la mayoría de los casos la tasa de evaporación calculada según Harbeck es mayor que la experimental y que a su vez la experimental es mayor que la de Heffner.

Tabla 1. Resumen de experiencias de evaporación.

Exp.	Duración (Días)	T máx	T mín	HR	Vel	Eem	E_Ha_m	E_He_m
1	5,28	33,7	18,8	79	5,3	3,8	2,6	1,7
2	1,65	32,7	22,0	77	1,7	3,2	4,7	3,2
3	2,63	32,9	21,5	78	0,9	2,8	3,4	2,5
4	4,98	35,6	21,1	46	2,3	4,0	6,7	3,8
5	2,19	27,3	9,3	74	1,2	3,5	4,1	2,9
6	2,65	30,2	17,5	76	1,7	3,5	5,1	3,9
7	1,01	28,4	18,1	67	2,6	3,7	4,7	3,1

Fuente: elaboración propia

En la figura 3 se representaron las tasas de evaporación media experimental, y calculadas según Harbeck y Heffner para las distintas experiencias, se observa claramente que la tasa calculada mediante Heffner se aproxima más a los resultados experimentales.

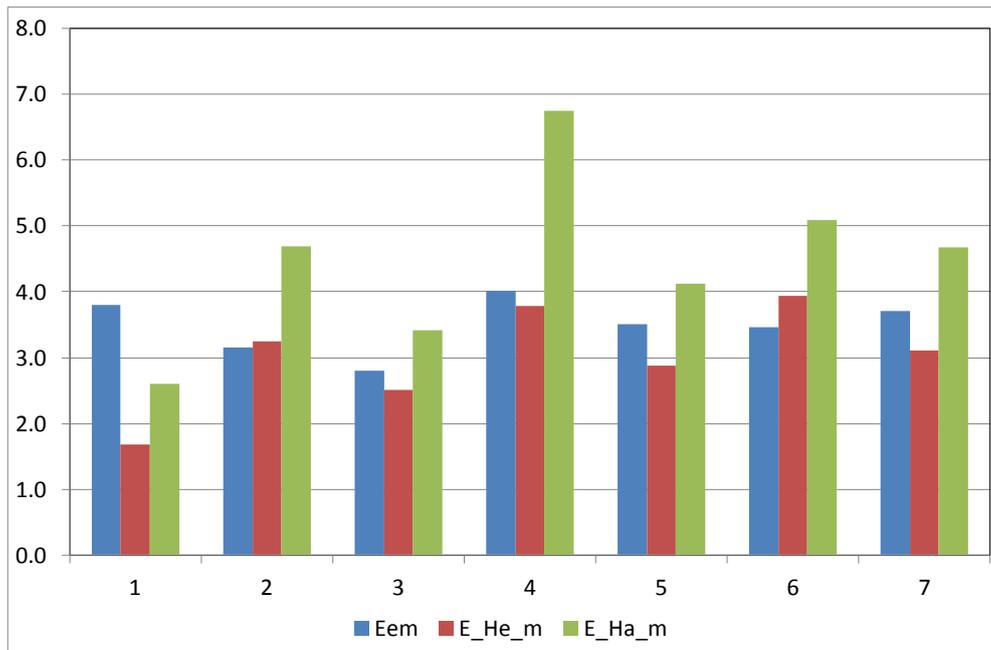


Figura 3. Tasa evaporación experimental y teórica para las diferentes experiencias.  
Fuente: elaboración propia

### 3.2 Temperatura del estanque

Mediante el primer principio de la termodinámica para un sistema cerrado en estado transitorio se pueden relacionar los distintos flujos de energía con la energía almacenada en el agua que está relacionada directamente con la temperatura del agua. Como los datos meteorológicos se adquirieron cada 15 minutos se suponen que estos parámetros permanecen constantes durante ese periodo y se calcula una temperatura del agua para el final de dicho periodo que a su vez se toma como temperatura del inicio del siguiente periodo de tiempo, esta secuencia de cálculo se implementó mediante una planilla de cálculo y se ejecutó para las distintas experiencias efectuadas. La tasa de evaporación se calculó para cada periodo mediante la ecuación de Heffner.

En la figura 4 se representaron las variables meteorológicas para uno de los días de ensayo, la temperatura medida en una de las bandejas y la temperatura simulada mediante el balance de energía en estado transitorio. Se ajustó el flujo de radiación durante la noche y la constante de la tasa de evaporación de la ecuación de Heffner, logrando una muy buena correlación entre el valor de temperatura calculado y el medido experimentalmente. Se examinó como afectan la variación de los diferentes parámetros a la temperatura del estanque y se observó que la profundidad del estanque o recipiente es una variable relevante que afecta muchísimo a la temperatura del agua.

En el análisis energético se relacionan fenómenos superficiales como la evaporación, la radiación y la convección con fenómenos volumétricos relacionados con la masa como es el almacenamiento de energía debido al cambio de temperatura. El parámetro que vincula la superficie del estanque con su volumen es la profundidad del estanque y de ahí nace su relevancia.

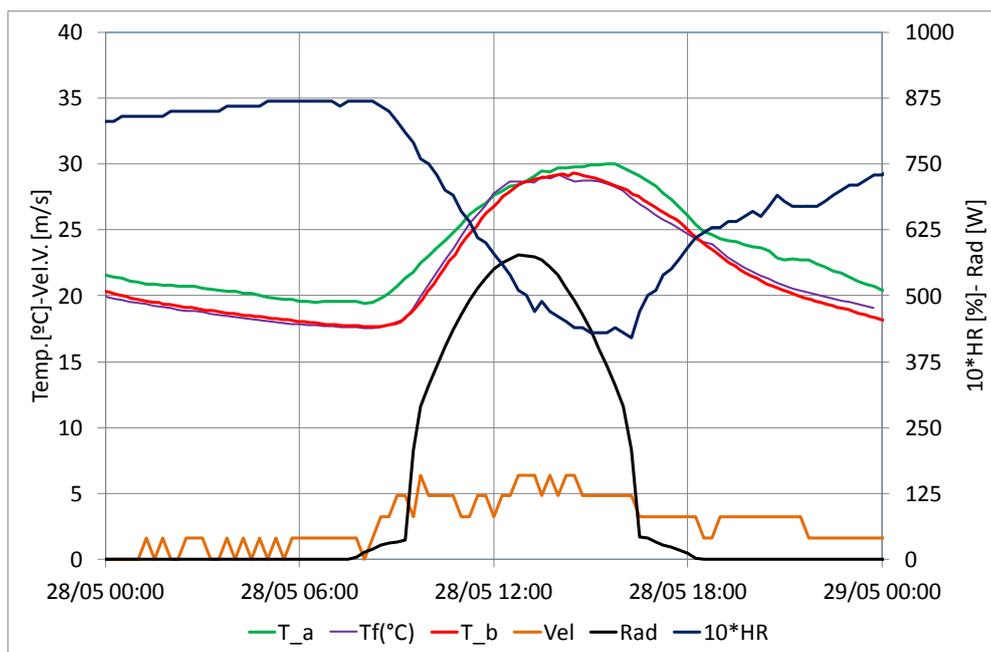


Figura 4. Temperaturas ambiente, simulada y medida de la bandeja, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa de la experiencia N°6.

Fuente: elaboración propia

En la figura 5 se expone la evolución de la temperatura que predice el modelo para un estanque con una profundidad de 1m y una superficie de 100m<sup>2</sup> durante un periodo de 3 días en función de variables meteorológicas reales. Se puede observar que las amplitudes de las oscilaciones diarias de temperatura son mucho mas pequeñas que las amplitudes de la temperatura ambiente.

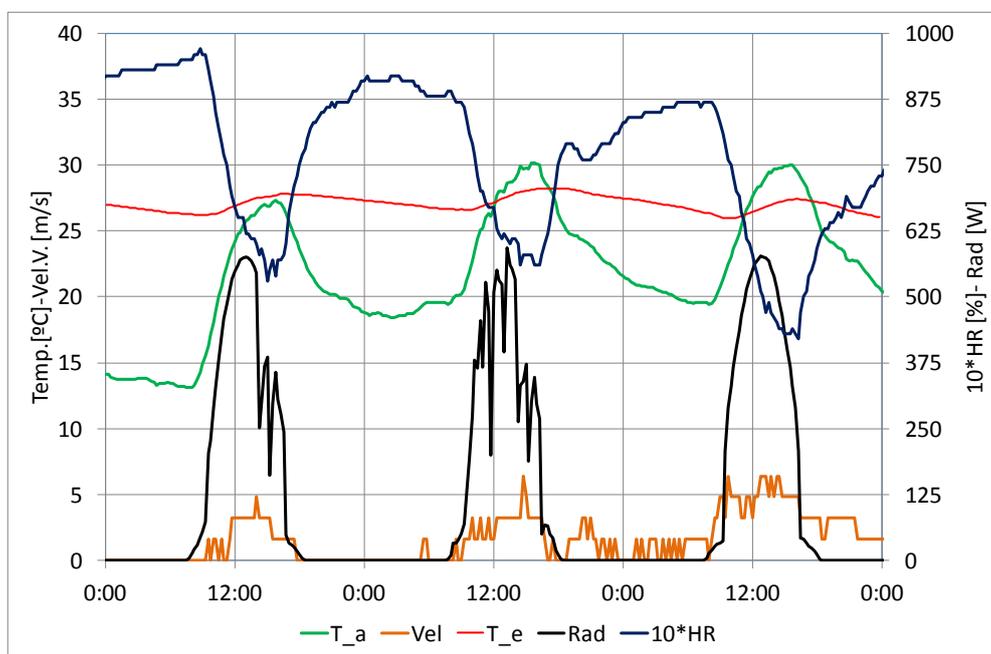


Figura 5. Temperaturas ambiente, velocidad del viento, temperatura simulada del estanque radiación solar y humedad relativa de la experiencia N°6.

Fuente: elaboración propia

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

La tasa de evaporación calculada con la ecuación de Harbeck es la que mejor se aproxima a la tasa de evaporación determinada experimentalmente.

El modelo termodinámico desarrollado, convenientemente ajustado, predice la temperatura medida durante las experiencias de laboratorio.

Si se analiza la expresión analítica de la temperatura del estanque, que se obtuvo como resultado del principio de conservación de la energía en régimen transitorio (ecuación 32), se observa que la temperatura se aproxima exponencialmente a la temperatura de equilibrio, el exponente de esa función potencial es negativo, directamente proporcional al tiempo e inversamente proporcional a la profundidad del estanque, es decir a mayor profundidad mayor inercia térmica del mismo. Como corolario se puede establecer que las determinaciones de laboratorio tienen que efectuarse con modelos de la misma profundidad que el estanque y que si se quiere aumentar la inercia térmica del mismo se tiene que aumentar la profundidad.

Para las experiencias de laboratorio la amplitud de las oscilaciones diarias de la temperatura de las bandejas fue superior a la amplitud de la temperatura ambiente, cuando se modifican los parámetros, y fundamentalmente cuando se modifica la profundidad del cuerpo de agua, la amplitud se reduce significativamente y resulta muy inferior a la amplitud de la temperatura diaria.

Como perspectiva futura se realizarán experimentos con recipientes de mayor profundidad para ajustar y validar el modelo desarrollado y sería conveniente que se contraste dicho modelo con determinaciones efectuadas en estanque reales. También se estudiará el efecto que tiene colocar colectores solares flotantes sobre la superficie del estanque.

Agradecimientos: se agradece la valiosa colaboración en el presente trabajo de los estudiantes: Andrea Morinigo, Jesica Diaz y Leisa Radulovich.

#### 5. Referencias

- [1] PENMAN H.L. (1948). Natural Evaporation from Open Water Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 193, No. 1032 (Apr. 22, 1948), pp. 120-145
- [2] KLEMETSON S.L., ROGERS G.L. (1985) Aquaculture pond temperature modeling. Aquacult Eng;4 p.191-208.
- [3] ZHU S, DELTOUR J, WANG S. (1998). Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems. Aquaculture Eng18, p.201-17.
- [4] DILIP JAIN. (2005). Modeling the thermal performance of an aquaculture pond heating with greenhouse. Building and environment 42. Page 557-565
- [5] J. LAMOUREUX, T. R. TIERSCH, S. G. HALL (2006). Pond heat and temperature regulation (PHATR): Modeling temperature and energy balances in earthen outdoor aquaculture ponds. In: Aquaculture Engineering 34, p. 103-116.
- [6] HARBECK, G. E. Jr. (1962). A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper. 272, p. 101-105.

- [7] JOSÉ MIGUEL MOLINA MARTÍNEZ, V. MARTÍNEZ ÁLVAREZ, A. BAILLE Y M.M. GONZÁLEZ-REAL (2006). Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía. En: Ingeniería Del Agua Vol. 13 No. 3
- [8] J. A. DUFFIE, W. A. BECKMAN, (1991). Solar Engineering of Thermal Processes. J. Wiley & Sons Inc. p.157-158
- [9] MCADAMS, W. H., 1942. Heat transmission, second ed. McGraw-Hill Book Company Inc, pp. 459.
- [10] WATMUFF J. H., Charters W.W. S. and Proctor D. (1977). Solar wind induced external coefficients for solar collectors.

## 6. Apéndice: Nomenclatura

Magnitud	Unidad	Descripción
A	m <sup>2</sup>	área del estanque
C	kJ/kg°C	calor específico del agua
U	J	Energía interna del estanque en un momento dado
e <sub>a</sub>	kPa	presión de vapor del aire en el ambiente
e <sub>s</sub>	kPa	presión de vapor saturado a la temperatura del agua
<i>h<sub>air</sub></i>	W/m <sup>2</sup> K	coeficiente de transferencia de calor por convección
<i>h<sub>s</sub></i>	hr	Hora después de la medianoche
<i>m<sub>w</sub></i>	Kg	masa del agua
<i>q<sub>conv</sub></i>	W	Tasa de intercambio de calor por el aire por convección.
<i>q<sub>evap</sub></i>	W	Flujo de energía perdida a través de la evaporación del agua.
<i>q<sub>rad</sub></i>	W	Flujo de energía intercambiado por radiación entre el estanque y el sol o el cielo nocturno.
<i>q<sub>fondo</sub></i>	W	Flujo de calor intercambiado por conducción por el fondo.
<i>T</i>	°C	Temperatura promedio del agua en el estanque.
<i>T<sub>i</sub></i>	°C	Temperatura inicial del agua.
<i>T<sub>f</sub></i>	°C	Temperatura al final del período considerado
<i>T<sub>∞</sub></i>	°C	Temperatura del agua para un tiempo infinito
<i>T<sub>air</sub></i>	°C	Temperatura del aire ambiente
<i>T<sub>DP</sub></i>	°C	Temperatura de punto de rocío
<i>T<sub>S</sub></i>	K	Temperatura equivalente del cielo nocturno
V	m/s	Velocidad del viento
e	m	Espesor de las paredes de la bandeja
<i>R<sub>t</sub></i>	m <sup>2</sup> °C/W	Resistencia térmica en la conducción por el fondo
E	mm/día	Tasa de evaporación
DPV	kPa	Déficit de presión de vapor.
<i>φ<sub>air</sub></i>	%	Humedad relativa del ambiente
ε		Emisividad de la superficie
σ	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	Constante de Stefan-Boltzmann
λ	W/m°C	Conductividad térmica del PVC