

APROXIMACIÓN AL BALANCE ENERGÉTICO NOCTURNO INVERNAL DE LA PLAYA DEL RÍO QUEQUEN GRANDE

María Cintia Piccolo^{1,2}, Juan Diego Amador Rivero³ y Gerardo M.E. Perillo^{1,4}

¹Instituto Argentino de Oceanografía, C Correo 804, 8000 Bahía Blanca, Argentina

²Dto de Geografía, U N S, 12 de Octubre y San Juan, 8000 Bahía Blanca, Argentina

³Universidad de la Laguna, España

⁴Depto de Geología, U N S, San Juan 760, 8000 Bahía Blanca, Argentina

RESUMEN

Se realiza una investigación del balance energético nocturno invernal en las playas y estuario del río Quequén Grande. Para ello se realizaron mediciones de temperatura en los sedimentos a distintas profundidades, en el agua y en el aire. Para el cálculo de los flujos turbulentos se utilizaron las fórmulas aerodinámicas de masa. Con las temperaturas observadas se calculó el coeficiente de difusividad térmica. Su valor resultó comparable con aquellos publicados en la literatura. Los gradientes verticales de temperatura del sedimento fueron importantes, a pesar de ser condiciones nocturnas e invernales. Estos son significativamente modificados por la inundación de la marea. Los flujos del calor del suelo y la evaporación resultaron las componentes más importantes del balance de energía en presencia de viento en la playa, mientras que con condiciones de calma el flujo radiativo adquirió mayor relevancia. El balance energético en el agua fue considerablemente menor.

ABSTRACT

An investigation about the balance energy flux was carried out in the beaches of the Quequén Grande River Estuary. Measurements of temperature of air, water and sediment at different levels were obtained. The bulk aerodynamical formulas were used in the calculation of the turbulent fluxes. The thermal diffusivity was calculated from the observations. The value was comparable to others published in the literature. Vertical temperature gradients in the sediment were significant, even though the measurements were performed during the night and in winter time. The sediment thermal gradients were significantly modified by the tidal inundation. Soil and latent heat flux were the most important components of the balance equation for the beach under windy conditions. However, the radiative flux was important with calm weather conditions. The energy balance components in the water were smaller than in the beach ones.

1. INTRODUCCION

En el Sudeste de la provincia de Buenos Aires existe una importante red hídrica en la que sobresale el río Quequén Grande, cuya cuenca se localiza entre los 37° 27' S y los 58° 29' O (Campo de Ferreras y Piccolo, 1997). Este río se destaca tanto por las dimensiones de su cuenca como por presentar una red de tipo dendrítica. En su desembocadura se localiza el núcleo poblacional Quequén-Necochea, sede de uno de los más importantes puertos marítimo del país.

El sector litoral de la cuenca presenta alternancia de formas acantiladas y playas con médanos de arena fina, las cuales se han desarrollado sobre limos loessicos de

Aproximación al balance energético nocturno invernal ...

edad Pampeana consolidados y estratos de tosca. Estas características han favorecido la localización de centros turísticos importantes en el ámbito nacional, cuyo máximo dinamismo se da en verano alcanzando altas densidades de población. En este ambiente se encuentra la desembocadura del río Quequén Grande, cuya boca se caracteriza por la presencia de extensas playas, especialmente sobre el lado de Necochea.

El estudio de las propiedades físicas de las playas, en particular de la temperatura del sedimento es importante pues constituye un parámetro básico para evaluar los aspectos físicos y biológicos del ecosistema costero. Las propiedades físicas de los suelos han sido estudiadas desde un punto de vista teórico (p.e., Horton y Wieringa, 1983; Novak y Black, 1985; de Vries, 1966; Novak, 1986; Cautenet *et al.*, 1986; Sikora *et al.*, 1990) y descriptivo (p.e., Carslaw y Jaeger, 1978; Oke, 1978). Comparativamente, escasos trabajos han sido realizados en zonas costeras sujetas a la inundación de la marea y donde el régimen térmico es afectado por el contacto del agua y del aire de acuerdo al estado de la misma. El análisis de las temperaturas de los sedimentos de las playas (p.e., Tuller, 1972; Kjerfve, 1978; Jehn y Jehn, 1979; Smith, 1981, 1982) son menos comunes en comparación con aquellas compuestas por sedimentos limosos típicas de zonas intermareales (Vugts y Zimmerman, 1982; Sequeira y Piccolo, 1985; Harrison, 1985; Stathers *et al.*, 1988; Piccolo *et al.*, 1993).

Las capas superiores de los sedimentos intermareales se caracterizan por fluctuaciones de temperatura de período corto. Estas son producidas por bruscos cambios en la temperatura ambiente o por acción de la inundación de los sedimentos por la marea (Harrison y Phizacklea, 1987). Un aspecto no contemplado en los estudios previos realizados en el estuario del río Quequén Grande es el intercambio energético de interacción entre los sedimentos de la playa y los fluidos: aire y agua. El cálculo del balance energético permite estudiar la importancia de los procesos de interacción energética, por un lado, entre la atmósfera-sedimento y, por otro, entre la atmósfera y el agua. Este conocimiento es de gran significado para relacionarlos con la flora y fauna de un determinado sitio. En este caso en particular se analiza el intercambio energético entre cada componente del ecosistema considerando sus variaciones de temperatura sin el efecto de la radiación de onda corta proveniente del sol. Se pretende estudiar los intercambios energéticos nocturnos durante el período invernal.

2. METODOLOGÍA

Las mediciones han sido efectuadas diariamente, pero el análisis se ha concentrado en realizar una aproximación del balance de calor nocturno. Por lo tanto, los datos que se han analizado comprenden el período de tiempo desde las 22:00 a las 5:00 horas entre los días 4 y 6 de agosto de 1998 en una playa interior del estuario a 3 km (a lo largo del cauce) de la boca del estuario. Las temperaturas del sedimento, agua y aire fueron medidas con cinco termistores. Un termistor fue localizado en el aire a 30 cm de la superficie, otro en el agua y otros tres enterrados en el sedimento, a 5, 15 y 30 cm de profundidad, respectivamente. El período de muestreo fue de 15 minutos.

Tanto los termistores como el data logger fueron desarrollados y calibrados en el IADO.

Los datos meteorológicos fueron obtenidos de una estación automática Davis Weather Station II, con la que se adquirieron datos de temperatura del aire, presión atmosférica, humedad relativa, punto de rocío, velocidad y dirección del viento. Toda esta información ha sido obtenida con el mismo intervalo de muestreo que los termistores. Simultáneamente se obtuvo información de marea del mareógrafo instalado en el puerto a menos de 2 km del sitio de medición. Las condiciones meteorológicas durante el período de medición fueron con escaso viento y presencia de nubosidad.

3. EL BALANCE ENERGÉTICO

Para calcular las diferentes componentes del balance energético se consideraron las siguientes fórmulas termodinámicas:

3.1. Balance de calor en el agua

Se consideró la siguiente ecuación de balance:

$$Q_n^* = Q_h + Q_c + Q_a$$

donde

Q_n^* = flujo neto radiativo

Q_c = flujo de calor latente

Q_h = flujo de calor sensible

Q_a = flujo de calor advectivo

En el presente trabajo se realizó la aproximación de que el flujo de calor advectivo es muy pequeño, dado que durante las observaciones la velocidad del viento fue escasa y en algunas circunstancias nula. Cabe destacar que no se consideró este término tampoco en la ecuación de balance energético de la playa. Los flujos turbulentos de calor fueron calculados mediante las siguientes fórmulas aerodinámicas de masa (Friehe y Schmitt, 1976). Este autor brinda diferentes fórmulas para condiciones de tiempo neutras, estables e inestable considerando la velocidad del viento (V) en m/s, la temperatura de la superficie del agua (T_s) y del aire (T_a) en $^{\circ}\text{K}$, la densidad del aire (Δ_a) en kg/m^3 y la capacidad específica del aire a presión constante (c_{ap}) en $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Flujo de calor sensible

1) para condiciones neutras, $0 < V (T_s - T_a) < 25$

$$Q_h = \Delta_a c_{ap} \{ 0.002 + 0.97 \cdot 10^{-3} V (T_s - T_a) \} \quad [\text{m K s}^{-2}]$$

2) para condiciones muy inestables, $V (T_s - T_a) > 25$

Aproximación al balance energético nocturno invernal ...

$$Q_h = \Delta_a c_{ap} \{1.46 \cdot 10^{-3} V (T_s - T_a)\} \quad [m K s^{-2}]$$

3) para condiciones estables, $V (T_s - T_a) < 0$

$$Q_h = \Delta_a c_{ap} \{0.0026 + 0.86 \cdot 10^{-3} V (T_s - T_a)\} \quad [m K s^{-2}]$$

Flujo de calor latente

$$Q_e = L E = L \{1.32 \cdot 10^{-3} V (q_s - q_a)\}$$

donde L es el calor latente de vaporización, q_s y q_a las humedades específicas del agua y del aire y E la evaporación.

Flujo neto radiativo

$$Q_n = 0.2 \cdot 5.67 \cdot 10^8 T_a^4 - 171 \quad (\text{Swinbank en Oke, 1978})$$

$$Q_n = T_a - 107 \quad (\text{Monteith, en Oke, 1978})$$

donde T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}K$). Se compararon ambas fórmulas para la estimación de la radiación neta de onda larga.

3.2. Balance de calor en la playa

Se consideró la siguiente ecuación de balance:

$$Q_n = Q_h + Q_e + Q_g$$

donde

$$\begin{array}{ll} Q_n = \text{flujo neto radiativo} & Q_g = \text{flujo de calor dentro del sedimento} \\ Q_e = \text{flujo de calor latente} & Q_h = \text{flujo de calor sensible} \end{array}$$

Los flujos de calor fueron calculados por las siguientes fórmulas aerodinámicas de masa, donde

$$Q_h = \Delta_a c_{ap} d_h (T_s - T_a) \quad (\text{Kjerfve, 1978})$$

Siendo $d_h = \text{Velocidad de transferencia} = 0.3 (1 + V) 10^{-2}$

$$Q_e = L E = c (0.035 e_s) (100 - HR)^{1/2} \quad (\text{Eagleman, 1967})$$

$$Q_g = \lambda \Delta (\Delta t / \Delta z)$$

donde $\lambda = \text{conductividad térmica (W/m}^{\circ}\text{K)}$, $c = 1.13$ y HR la humedad relativa (%).

Cabe destacar que se utilizaron las mismas fórmulas para el cálculo del balance radiativo en el sedimento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los períodos de medición se caracterizaron por temperaturas del aire (a 5 metros de altura) que fluctuaron entre los 10 y 12°C en la noche del 4 al 5 de agosto de 1998 y entre 11 y 14.3°C durante la noche del 5 al 6 de agosto del mismo año. La humedad relativa varió entre 80 y 95% en ambos períodos de medición y la velocidad del viento fue casi nula durante el primer período de medición alcanzando su máxima velocidad de 4.9 m/s a las 4 hs de la mañana del día 6 de agosto de 1998. La presión atmosférica osciló entre 1010.5 y 1012.0 hPa y la dirección del viento fue del SO. Durante la segunda noche la presión atmosférica varió entre 1011.8 y 1008.6 hPa y la velocidad del viento se mantuvo constante del N con velocidades medias de 4 m/s.

La comparación de las dos fórmulas más utilizadas en la literatura, Swinbank y Monteith (Oke, 1978) para el cálculo del balance radiativo de onda larga utilizando la temperatura del aire, resultaron muy similares. La figura 1 muestra ambas curvas correspondientes a la noche del 4 al 5 de agosto. Se observa una diferencia menor que 2 W/m². Por lo tanto para el cálculo del balance de calor en ambos medios se utilizó la fórmula de Swinbank. Las mediciones se realizaron durante bajamar y luego con marea creciente. Se presenta un ejemplo correspondiente las condiciones de la marea durante la primer noche de medición (figura 2).

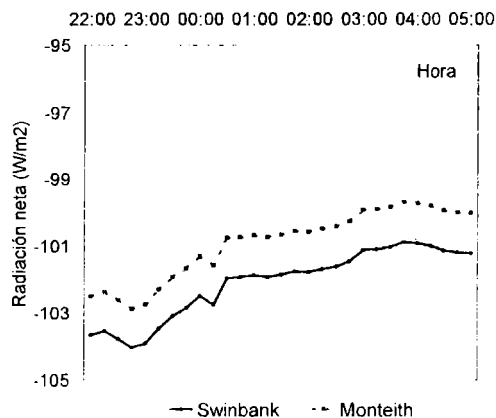


Figura 1. Comparación de las fórmulas de radiación neta de onda larga correspondiente a la noche del 4 al 5 de agosto de 1998.

La variación de la temperatura dentro del sedimento fue significativa. Como era de esperar la temperatura del sedimento a mayor profundidad es mayor que la de los sedimentos superficiales, debido a la pérdida de calor por radiación y a los flujos de calor sensible y latente. La figura 3 muestra la variación de las temperaturas observadas por los diferentes termistores. La temperatura del agua es la más cálida y la

Aproximación al balance energético nocturno invernal ...

del aire a 1 metro de altura la más fría alcanzando valores cercanos a los 5°C. De lo que se deduce que las mediciones se realizaron en condiciones meteorológicas estables, es decir en la superficie se observó una inversión de temperatura.

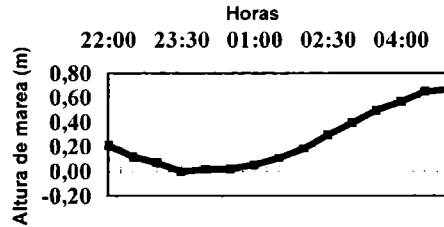


Figura 2. Altura de la marea, 4 al 5 de agosto de 1998

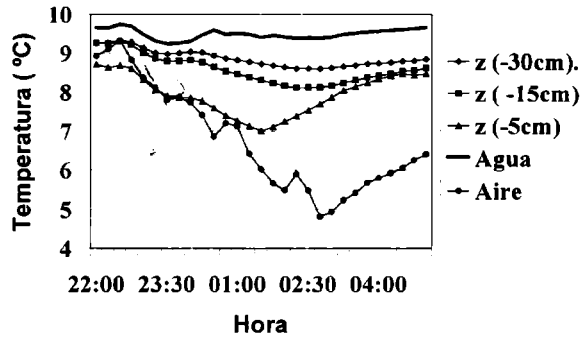


Figura 3. Variación temporal de la temperatura del aire, agua y sedimentos en el sitio de estudio

Las temperaturas del sedimento cercanas a la superficie sufrieron variaciones similares a las de la superficie del aire. La temperatura del sedimento a $-0,5$ cm tiende a fluctuar en respuesta a los cambios de la temperatura del aire y a la inundación de la marea. La figura 4 muestra los perfiles verticales nocturnos de los sedimentos. Los números en cada perfil corresponden a las horas de medición. Se observa que las temperaturas superficiales desciende en forma continua hasta las 2 hs del día 5 de agosto y luego comienzan a elevar su temperatura debido a la inundación de la marea en el sitio de medición (Ver figura 2).

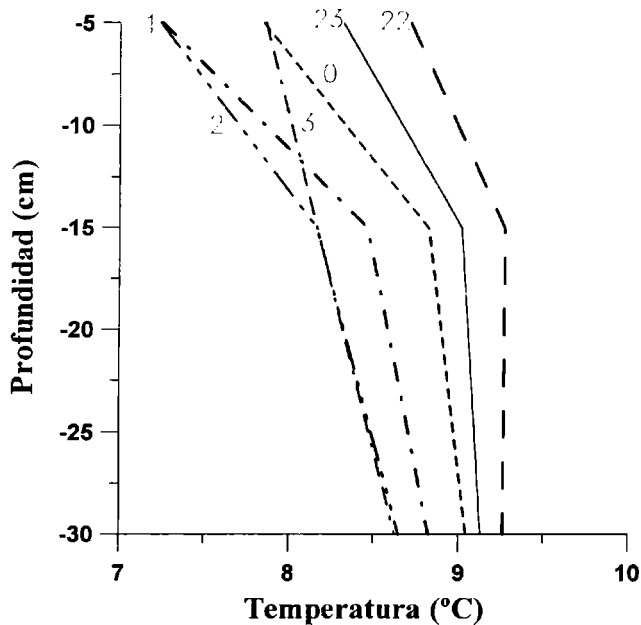


Figura 4. Perfiles verticales de la temperatura del sedimento durante la noche del 4 al 5 de agosto de 1998.

En la mayoría de los suelos, el contenido de agua, la compactación y composición del mismo cambian con la profundidad. Los sedimentos son medios que sufren transferencia de calor mediante diferentes mecanismos que operan simultáneamente: conducción molecular, movimiento de agua y aire, evaporación y radiación (Oke, 1978). Valores precisos de difusividad térmica (k) son difíciles de medir *in situ*, por lo tanto se recurre a mediciones indirectas ampliamente utilizadas en la literatura (Horton *et al.*, 1983). La mayoría se basa en la solución de la ecuación de conducción de calor unidimensional con difusividad constante (Piccolo *et al.*, 1993). Por lo tanto, para calcular la difusividad térmica se utilizó la siguiente fórmula (Oke, 1978)

$$k = \frac{\pi(\Delta z)^2}{P \ln^2(A_1 / A_2)}$$

donde A es la amplitud de la onda de temperatura en los sedimentos a las profundidades z_1 y z_2 , P es período de la onda de temperatura y Δz es igual a $z_1 - z_2$. Considerando la fórmula precedente se hallaron valores de $k = 9.43 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esta estimación concuerda favorablemente con los hallados por Oke (1978) y Harrison y Phizacklea (1987).

Aproximación al balance energético nocturno invernal ...

Las diferentes componentes del balance de calor en la playa y en el agua se presentan en las figuras 5 y 6. A modo de ejemplo se presentan los resultados de las condiciones nocturnas correspondientes al día 5-6 de agosto. En la figura 5 se observa que los flujos más significativos los constituyen el flujo de calor latente, es decir la evaporación y el flujo de calor desde el sedimento. En el primer caso, la evaporación resultó la componente más importante al ser comparada con los cálculos del día previo, debido a que la intensidad del viento fue mayor. El flujo de calor desde el suelo hacia la atmósfera resultó igualmente importante pues los sedimentos estaban más cálidos que la atmósfera circundante. Se produjo un pasaje de calor significativo entre un medio y el otro. El flujo de calor sensible y la radiación neta de onda larga fueron menores, tal cual era esperado, debido a que no existieron diferencias significativas de temperatura en la atmósfera y en el suelo. Cabe destacar la dependencia de ambos flujos de ese parámetro.

En el caso del balance energético del agua (figura 6) se observa que la energía radiativa se distribuye en el flujo de calor latente, sensible y el resto, que no ha sido medido en este experimento, se acumula como energía calórica en el agua. Como se observa las variaciones de temperatura del agua y del aire adyacente al mismo durante la noche, sumado a condiciones de alta humedad, no generaron un flujo de calor latente significativo, resultando la radiación la componente más importante del balance energético nocturno del agua.

El comportamiento del flujo energético en ambos medios es distinto. Por un lado, los valores de calor latente y del sedimento en la playa son mayores que en el agua, es decir, las transferencias energéticas entre el sedimento y la atmósfera son de mayor magnitud que entre el agua y esta. En el caso de la playa se observa un decrecimiento marcado de los valores conforme avanza la noche debido a la inundación de la marea. Durante la bajamar el flujo de calor desde el suelo es mayor.

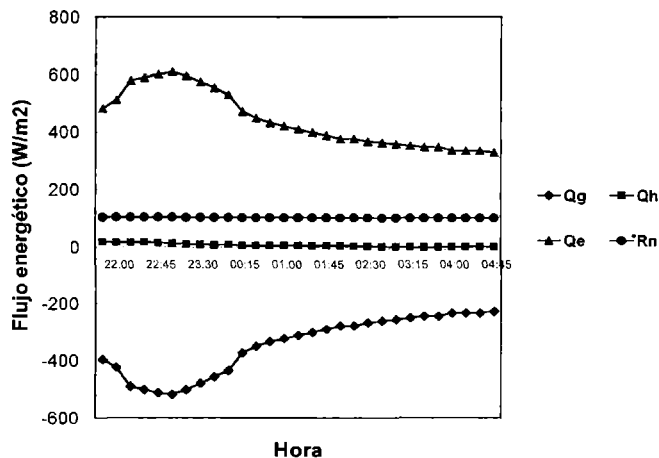


Figura 5. Balance energético en el sector de playa del estuario del Río Quequén Grande en la noche del 5 al 6 de agosto de 1998.

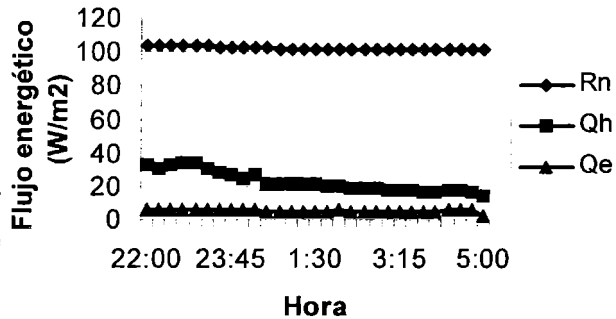


Figura 6. Balance energético en el estuario del río Quequén Grande en la noche del 5 al 6 de agosto de 1998.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación del balance energético del estuario del río Quequén Grande constituye el primer estudio realizado hasta el presente en esa zona sobre el tema. El objetivo fue analizar los flujos nocturnos invernales de energía en la playa que bordea el río y en el río en sí mismo. Se observó una estratificación térmica significativa en los sedimentos. La magnitud de estos gradientes térmicos está relacionada con el tiempo en que estos están en contacto directo con la atmósfera, las condiciones atmosféricas y el tiempo de inundación de la marea.

Si se comparan los resultados obtenidos en las condiciones nocturnas se observa que la variación de las componentes del balance energético, especialmente para el agua, son significativamente menores a los diurnos y la energía es utilizada mayormente para acumular calor en el agua. Estos resultados deben ser considerados preliminares, dado que se necesitan mediciones continuas de estos parámetros en períodos cercanos o iguales al año.

Agradecimientos: Este trabajo se realizó con subsidios por parte del CONICET, la Universidad Nacional del Sur y de la Comunidad Económica Europea. Los autores agradecen al personal del Laboratorio de Electrónica del IADO el desarrollo y construcción del sistema de termistores y el data logger.

REFERENCIAS

- Campo de Ferreras, A. y Piccolo, M.C. 1997. Balance hídrico en la cuenca del río Quequén Grande, Argentina. *Revista Geofísica*, IPGH, México, 46, 45-66.
- Carslaw, H.S. y Jaeger, J.C., 1978. *Conduction of heat on soils*. Oxford University Press, 519 pp.

Aproximación al balance energético nocturno invernal ...

- Cautenet, G., Legrand, M., Coulibaly, Y. y Boutin, C, 1986. Computation of ground surface conduction of heat flux by Fourier analysis of surface temperature. *J. Of Climate and Applied Meteorology*, 25, 277-283.
- de Vries, D.A., 1966. Thermal properties of soils. In *Physics of plant environment* Van Wijk, W.R.. (Ed) North Holland, 210-235.
- Harrison, S.J., 1985,. Heat exchange in muddy intertidal sediments, Chichester Harbour, West Sussex, *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 20, 477 – 490.
- Harrison, S.J. y Phizacklea, A.P., 1987. Temperature fluctuations in muddy intertidal sediments, Forth estuary Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 24, 279-288.
- Horton, R. y Wieringa, P.J., 1983. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface. *Soil Science Society American Journal*, 47, 14-20.
- Jehn, K.H. y Jehn, M. S., 1979. Beach atmosphere. *Weather*, 34, 223 – 232.
- Kjerfve, B., 1978. Diurnal energy balance of a Caribbean barrier reef environment. *Bulletin of Marine Science* 28, 137-145.
- Novak, M.D., 1986. Theoretical values of daily atmospheric and soil thermal admittances. *Boundary-layer meteorology*, 34, 17-34.
- Novak, M.D. y Black, T.A., 1985. Theoretical determination of the surface energy balance and thermal regimes of bare soils. *Boundary-layer Meteorology*, 33, 313-333.
- Rosenberg, J., 1974. *The biological environment*. Ed: Wiley, J. & Sons.
- Oke, T.R., 1978. *Boundary Layer Climates*. Methuen & Co. Ltd., New York, 372 pp.
- Sequeira, M.E. y Piccolo, M.C, 1985. Predicción de la temperatura del agua durante la bajante de la marea en Ingeniero White. *Meteorologica*, XV, 59 – 76.
- Sikora, E., Gupta, S.C. y Kossowoski, J., 1990. Soil temperature predictions from a numerical heat flow model using variable and constant thermal diffusivities. *Soil and Tillage Research*, 18, 27, 36.
- Smith, N.P., 1981. Energy balance in a shallow sea grass flat winter conditions. *Limnology and Oceanography* 26, 482 – 491.
- Smith, N.P., 1982. An investigation of the heat budget of the Indian River lagoon, Florida, during winter months. *Oceanologica Acta*, 185 - 189.
- Stathers, R.J., Black, T. A. y Novak, M.D., 1988. Modelling surface energy fluxes and temperature in a dry and wet bare soils. *Atmosphere-ocean* 26, 59 – 73.
- Tuller, S.E., 1972. Energy balance microclimatic variations on a coastal beach.. *Tellus*, 24, 260-270.
- Vugts, H.F. y Zimmerman, J.T.F., 1982. Heat balance investigation of tidal flats. In *First International Conference on Meteorology and Air-Sea Interaction of the Coastal Zone*. American meteorological Society, 277 – 280.