

Soil heat exchange in Puerto Cuatrerros tidal flats, Argentina

Intercambio de calor en el suelo en las planicies de marea de Puerto Cuatrerros, Argentina

Débora Beigt^{1*}
M. Cintia Piccolo^{1,2}
Gerardo M. E. Perillo¹

¹ Instituto Argentino de Oceanografía, CONICET
Camino La Carrindanga km 7
Casilla de correo 804
(8000) Bahía Blanca, Argentina
*E-mail: dbeigt@criba.edu.ar

² Universidad Nacional del Sur
Departamento de Geografía
12 de Octubre y San Juan
(8000) Bahía Blanca, Argentina

Recibido en marzo de 2003; aceptado en agosto de 2003

Abstract

Some interaction processes at the sediment-water and sediment-atmosphere interfaces were analyzed for each season of the year using mass aerodynamic formulas. Data were collected from Puerto Cuatrerros tidal flats (Bahía Blanca estuary, Argentina) during an entire year (2000). The soil temperature was measured every 10 min by a thermistor chain at three levels below the sediment surface (–0.05, –0.15 and –0.25 m). Water and air temperatures, solar radiation and meteorological data were registered simultaneously, resulting in annual means of 14.07°C (soil at –0.15 m), 13.69°C (air) and 14.51°C (water). Atmospheric and tidal conditions regulated the mudflat's thermal behavior. The soil temperature vertical profiles showed a diurnal and semidiurnal cycle due to the influence of these factors. The diurnal thermal amplitude at –0.05 m reached 14.6°C on 20 February 2000, but only 2.8°C on 1 July 2000. Most fluctuations of sediment temperatures were observed in the first 15 cm, with vertical gradients of 0.82°C cm⁻¹ during summer. In order to obtain the soil heat capacity, the granulometric composition of a sediment column was analyzed. Soil heat fluxes during a typical summer and winter day were compared. A net heat gain in the soil was observed during the summer day (+840.6 kJ m⁻²) and an inverse situation was found in winter, with a diurnal heat exchange of –768.6 kJ m⁻².

Key words: sediment heat flux, soil temperature, tidal flats, Bahía Blanca estuary.

Resumen

Se analizaron procesos de interacción sedimento-agua y sedimento-atmósfera para cada estación del año mediante fórmulas aerodinámicas de masa. Los datos fueron recolectados en la llanura intermareal de Puerto Cuatrerros (estuario de Bahía Blanca) durante un período anual (2000). La temperatura del suelo se midió cada 10 min empleando una cadena de termistores localizados a tres niveles de profundidad: –0.05, –0.15 y –0.25 m. Simultáneamente, se registraron las temperaturas del agua y del aire, la radiación solar y datos meteorológicos. Los valores medios anuales fueron 14.07°C, 13.69°C y 14.51°C para sedimento a –0.15 m, aire y agua, respectivamente. La radiación solar y las mareas regularon el comportamiento térmico de la planicie de marea. Debido a la influencia de estos factores los perfiles verticales de temperatura del sedimento mostraron un ciclo diurno y semidiurno. La amplitud térmica diurna a –0.05 m alcanzó los 14.6°C el 20 de febrero, mientras que durante el 1° de julio se observaron sólo 2.8°C de amplitud. Las mayores fluctuaciones en la temperatura del sedimento se registraron en los primeros 15 cm, desarrollándose gradientes verticales que alcanzaron los 0.82°C cm⁻¹ durante el verano. A fin de obtener la capacidad calorífica del suelo en estudio se analizó la granulometría de una columna de sedimentos. Se comparó el flujo de calor en el suelo durante un día típico de verano y uno de invierno evidenciándose una ganancia neta de calor durante la jornada estival (+840.6 kJ m⁻²) y una situación inversa en el invierno (–768.6 kJ m⁻²).

Palabras clave: flujo de calor en sedimentos, temperatura del suelo, planicies de marea, estuario de Bahía Blanca.

Introduction

Soil temperature is an essential parameter when evaluating physical and biological characteristics of coastal ecosystems. Temperature has a great influence on the population dynamics of pelagic and benthic communities inhabiting the intertidal zone. Soil temperature profiles result mainly from molecular diffusion of heat through the sediment, depending also on its thermal properties and atmospheric conditions (Harrison and Phizacklea, 1987a). In intertidal sediments in particular, solar radiation and tides are mechanisms that drive the thermal behavior of the tidal flats (Piccolo *et al.*, 1993).

The Bahía Blanca estuary (fig. 1), situated in the southwest of Buenos Aires Province, Argentina, is considered the second largest estuary in the country after the Río de la Plata estuary. It is a mesotidal, coastal plain environment formed by a series of major NW-SE trending channels separating extensive tidal flats, low salt marshes and islands (Perillo and Piccolo, 1999). The total surface of the estuary is approximately 2300 km², of which 1150 km² correspond to the intertidal sector. The principal energy input into the system is produced by a semidiurnal tidal wave (Perillo *et al.*, 2000).

Temperatures of muddy intertidal sediments have been analyzed in other parts of the world by different authors (Heath, 1977; Harrison and Phizacklea, 1984, 1985, 1987a, b; Piccolo *et al.*, 1993). Although work has been reported on the physical characteristics and hydrography of the Bahía Blanca estuary, as well as on the estuarine circulation (Arango, 1985; Sequeira and Piccolo, 1985; Serman, 1985; Perillo *et al.*, 1987; Piccolo *et al.*, 1987; Piccolo and Perillo, 1990; Perillo and Piccolo, 1991), specific knowledge about thermal characteristics of the tidal flats is needed. Because organisms inhabiting the mudflats are mostly infaunal species, the study of the sediment's thermal behavior is essential for understanding this habitat. Previous research about this subject in the Bahía Blanca estuary was carried out by Piccolo and Dávila (1991), who studied the thermal characteristics of intertidal sediments in Ingeniero White harbour (Bahía Blanca estuary), determining the mean thermal diffusivity in summer ($5.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) and winter ($3.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

This study was performed at Puerto Cuatros, located in the inner portion of the estuary, near its head (fig. 1). It forms part of the first stages of a larger interdisciplinary study focused on establishing relationships between temperature and biodiversity in the tidal flats of the estuary. The objective of this paper is to describe the characteristics of the sediment thermal behavior of the Puerto Cuatros tidal flats.

Material and methods

Soil, water and air temperatures were measured every 10 min during the 2000 calendar year by employing a thermistor chain. The thermistors were located below the sediment surface (0.05, 0.15 and 0.25 m depth), in the water column (1 m depth during ebb tide), and in the air column (0.05 and

Introducción

La temperatura del suelo es un parámetro esencial a los fines de evaluar las características físicas y biológicas de ecosistemas costeros. La temperatura tiene una gran influencia en la dinámica poblacional de comunidades pelágicas y bénticas que habitan la zona intermareal. Los perfiles de temperatura del suelo resultan principalmente de la difusión molecular de calor a través del sedimento, dependiendo también de sus propiedades térmicas y de las condiciones atmosféricas (Harrison y Phizacklea, 1987a). En sedimentos intermareales en particular, la radiación solar y las mareas son mecanismos que regulan el comportamiento térmico de las planicies mareales (Piccolo *et al.*, 1993).

El estuario de Bahía Blanca (fig. 1), localizado en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), es considerado el más grande del país después del estuario del Río de la Plata. Es un ambiente mesomareal de planicie costera formado por una serie de canales con orientación NO-SE, que separan extensas planicies de marea, marismas saladas bajas e islas (Perillo y Piccolo, 1999). El estuario cubre aproximadamente 2300 km², de los cuales 1150 km² corresponden al sector intermareal. Una onda de marea semidiurna constituye la principal entrada de energía al sistema (Perillo *et al.*, 2000).

Las temperaturas de sedimentos intermareales han sido analizadas en otras partes del mundo por diversos autores (Heath, 1977; Harrison y Phizacklea, 1984, 1985, 1987a, b; Piccolo *et al.*, 1993). Aunque se han realizado trabajos sobre las características físicas, la hidrografía y la circulación del estuario de Bahía Blanca (Arango, 1985; Sequeira y Piccolo, 1985; Serman, 1985; Perillo *et al.*, 1987; Piccolo *et al.*, 1987; Piccolo y Perillo, 1990; Perillo y Piccolo, 1991), aún se necesitan conocer específicamente las características térmicas de las planicies de marea. Como los organismos que habitan las planicies de marea son principalmente especies de la infauna, el estudio del comportamiento térmico de los sedimentos es esencial a los fines de conocer dicho hábitat. Piccolo y Dávila (1991) realizaron una investigación previa sobre esta materia en el estuario de Bahía Blanca. Estudiaron las características térmicas de sedimentos intermareales en el puerto Ingeniero White, determinando la difusividad térmica media en verano ($5.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) e invierno ($3.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

El área de estudio de esta investigación fue Puerto Cuatros, localizado en la porción interna del estuario, cerca de su cabecera (fig. 1). Este trabajo forma parte de las primeras etapas de un estudio interdisciplinario más amplio tendiente a establecer relaciones entre la temperatura y la biodiversidad de las planicies de marea del estuario. El objetivo del artículo es describir las características del comportamiento térmico de los sedimentos de las planicies mareales de Puerto Cuatros.

Materiales y métodos

Las temperaturas del suelo, agua y aire se midieron cada 10 min durante un período anual (enero a diciembre de 2000)

3 m height). The thermistor at 0.05 m in the air recorded water or air temperature depending on the tidal stage. Solar radiation was recorded by a pyranometer and tidal data were obtained by a tidal gauge, both installed in the study area. Meteorological data were gathered from an automatic weather station situated in Ingeniero White harbour. Although measurements were carried out during an entire year (2000), two days were analyzed in detail, a summer day and a winter day, each with the same tidal stage and a cloudless sky.

The soil heat flux (Q_G) was determined from temperature data using (Oke, 1978):

$$Q_G = -\lambda (\Delta T / \Delta z) \quad \lambda = K_s C$$

where T is sediment temperature [K], z is depth [m], λ is thermal conductivity [$W m^{-1} K^{-1}$], K_s is thermal diffusivity [$m^2 s^{-1}$], and C is heat capacity [$J m^{-3} K^{-1} 10^6$]. Thermal diffusivity was calculated from the heat conduction equation (Kjerfve, 1978):

$$K_s = (\Delta z / \Delta t)^2 / 2\omega$$

where Δt is the phase lag [s], ω is the diurnal oscillation frequency [$2\pi/P$], and P is the period [s]. A 25-cm-deep sediment core was extracted in order to analyze the grain size distribution at the laboratory. The heat capacity was obtained from tables (Oke, 1978) and estimated as a mean value of saturated clay and saturated sand heat capacities, typical conditions of the tidal flat sediments in the study area.

Results and discussion

Sediment analysis

The results of the grain size analysis are shown in table 1. Clay was dominant in the sediment column, increasing with depth. Silt represented a large percentage in the composition of all the samples, while gravel was absent. A different behavior was obviously observed for sand, its presence decreasing gradually from the sediment surface. Due to the prevailing fine fraction, water is retained in the pore spaces and sediment was saturated or near saturation point.

Daily cycle

Diurnal and seasonal variations of soil, water and air temperatures were important. Annual mean values of soil (at -0.15 m), air and water temperatures were 14.07°C, 13.69°C and 14.51°C, respectively. Figure 2 shows the temperature waves in the air, water and sediments during a typical summer day (20 February 2000) and a typical winter day (1 July 2000). The thermistor recording the air/water temperatures depending on tidal stage indicates the moment when sediments were flooded.

On the days mentioned, the air temperature ranged from 10.4°C to 33.1°C (summer) and from 2.1°C to 9.9°C (winter),

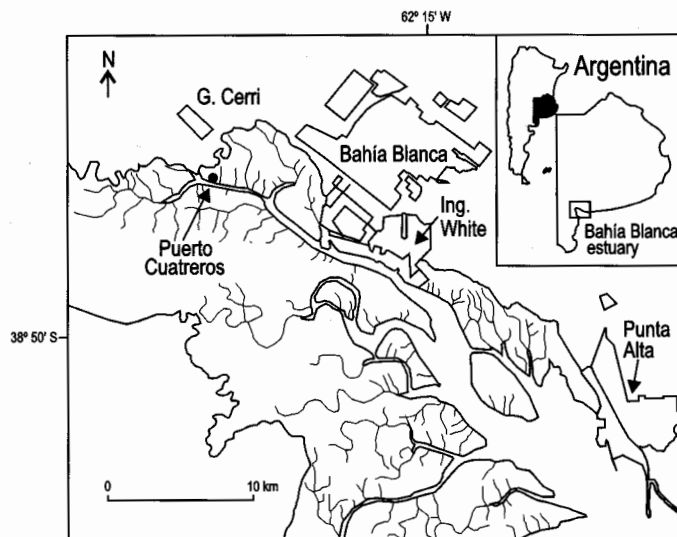


Figure 1. Map of the study area.
Figura 1. Ubicación del área de estudio.

empleando una cadena de termistores. Los termistores se situaron debajo de la superficie del suelo (a 0.05, 0.15 y 0.25 m de profundidad), en la columna de agua (a 1 m de profundidad en bajamar) y en la columna de aire (a 0.05 y 3 m de altura). El termistor ubicado a 0.05 m sobre la superficie del sedimento midió alternativamente la temperatura del agua y la temperatura del aire dependiendo del estado de marea. La radiación solar se registró por medio de un piranómetro y los datos de marea se obtuvieron de un mareógrafo, ambos instalados en el área de estudio. Los datos meteorológicos se obtuvieron de una estación meteorológica automática situada en el puerto Ingeniero White. Aunque se efectuaron mediciones durante un año completo (2000), se analizaron en detalle dos días, uno de verano y otro de invierno, ambos con el mismo estado de marea y cielo despejado.

El flujo de calor en el suelo (Q_G) se determinó a partir de los datos de temperatura usando (Oke, 1978):

$$Q_G = -\lambda (\Delta T / \Delta z) \quad \lambda = K_s C$$

donde T es la temperatura del sedimento [K], z es la profundidad [m], λ es la conductividad térmica [$W m^{-1} K^{-1}$], K_s es la difusividad térmica [$m^2 s^{-1}$] y C es la capacidad calorífica [$J m^{-3} K^{-1} 10^6$]. La difusividad térmica se calculó a partir de la ecuación de conducción de calor (Kjerfve, 1978):

$$K_s = (\Delta z / \Delta t)^2 / 2\omega$$

donde Δt es el retardo de fase [s], ω es la frecuencia de la oscilación diurna [$2\pi/P$], y P es el período [s]. En el área de estudio se extrajo un testigo de 25 cm de profundidad y se analizó la granulometría del sedimento en laboratorio. La capacidad calorífica se obtuvo de tablas (Oke, 1978) y se estimó como un promedio de las capacidades caloríficas de arcilla y

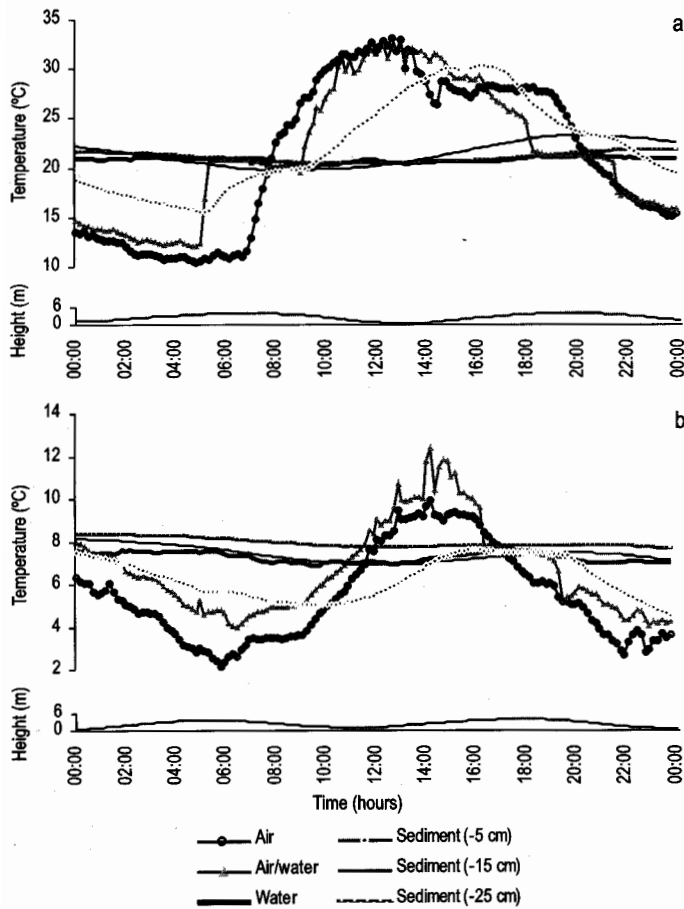


Figure 2. Diurnal temperature waves in the air, water and sediments during: (a) 20 February 2000; (b) 1 July 2000.

Figura 2. Ondas de temperatura diurnas en el aire, agua y sedimentos durante: (a) 20 de febrero de 2000; (b) 1° de julio de 2000.

resulting in a thermal amplitude of 22.7°C on the summer day and of 7.8°C on the winter day. The soil temperature waves showed a similar trajectory to that of the air, with a time lag that increased with depth. The time lag was estimated to be 3 h 40 min at -5 cm depth and 7 h 40 min at -15 cm on 20 February, and 1 h 40 min at -5 cm and 6 h at -15 cm on 1 July. Throughout the measuring period, time lags changed according to weather conditions (cloudiness, for example), but the two days taken as an example give an idea of the daily variation.

Changes in wave amplitudes were observed in depth and between seasons: the amplitudes were reduced at greater depth and a seasonal variation could be observed between summer and winter (amplitudes decreased faster on winter days). Damping depth (D) was estimated to be 9.5 cm on 20 February and 8.5 cm on 1 July (Monteith, 1973).

Besides seasonality, another factor that affected the soil temperature waves was the tidal inundation. This was more clearly evident during the summer day, when temperature gradients between air, water and sediment were greater. Due to solar radiation, the temperature wave of the upper sediment layer showed an absolute maximum between 14:00 and 17:30

arena saturadas, condiciones típicas de los sedimentos de las planicies de marea en el área de estudio.

Resultados y discusión

Análisis de los sedimentos

Los resultados del análisis de granulometría se muestran en la tabla 1. La arcilla predominó en la columna de sedimentos, incrementando su porcentaje con la profundidad. El limo representó un amplio porcentaje en la composición de todas las muestras. No se observó presencia de grava. La arena presentó un comportamiento diferente; obviamente su presencia se redujo gradualmente a partir de la superficie hacia niveles más profundos. Debido a la predominancia de la fracción fina, la retención del agua en los intersticios resultó en un estado de saturación o cercano a la saturación de los sedimentos en estudio.

El ciclo diario

Se observaron importantes oscilaciones diurnas y estacionales en las temperaturas del suelo, agua y aire. Los promedios anuales de las temperaturas en el suelo (a 0.15 m de profundidad), aire y agua fueron 14.07°C, 13.69°C y 14.51°C, respectivamente. La figura 2 muestra las ondas de temperatura en el aire, agua y sedimentos durante un día típico de verano (20 de febrero de 2000) y un día típico de invierno (1° de julio de 2000). El termistor que registra la temperatura del aire/agua dependiendo del estado de marea indica el momento en que los sedimentos fueron inundados por ésta.

En los días analizados la temperatura del aire osciló entre 10.4°C y 33.1°C (verano) y entre 2.1°C y 9.9°C (invierno), con una amplitud térmica de 22.7°C en el día estival y de 7.8°C en el día invernal. Las ondas de temperatura en el suelo mostraron una trayectoria similar a la del aire, con un retardo de fase que se incrementó con la profundidad. Dicho retardo se estimó para el 20 de febrero en 3 h 40 min y en 7 h 40 min a 5 y 15 cm de profundidad, respectivamente. Durante el 1° de julio éste fue de 1 h 40 min a 5 cm y de 6 h a 15 cm de profundidad. A lo largo del período de medición los retardos de fase variaron de acuerdo con las condiciones atmosféricas (nubosidad, por ejemplo); sin embargo, los dos días seleccionados como ejemplos permiten obtener una idea de la variabilidad diaria.

Se observaron cambios en las amplitudes de onda tanto en profundidad como estacionalmente: las amplitudes se redujeron al aumentar la profundidad y se observó una variación estacional entre verano e invierno (las amplitudes se redujeron más rápidamente durante los días de invierno). La profundidad estable (*damping depth*, D) se estimó en 9.5 cm para el 20 de febrero y en 8.5 cm para el 1° de julio (Monteith, 1973).

Además de la estacionalidad, la inundación mareal fue otro factor que afectó a las ondas de temperatura en el suelo. Esto se evidenció más claramente durante el día estival, cuando los gradientes de temperatura entre el aire, agua y sedimentos

Table 1. Granulometric classification of the sediments in Puerto Cuatrerros tidal flats.**Tabla 1.** Clasificación granulométrica de los sedimentos en las planicies mareales de Puerto Cuatrerros.

Sample	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Classification
0 – 5 cm	38.76	33.03	28.21	Clayed silt sand
5 – 10 cm	16.50	41.58	41.92	Silty clay
10 – 15 cm	3.33	45.56	51.10	Silty clay
15 – 20 cm	1.18	48.02	50.80	Silty clay
20 – 25 cm	1.22	43.57	55.21	Silty clay

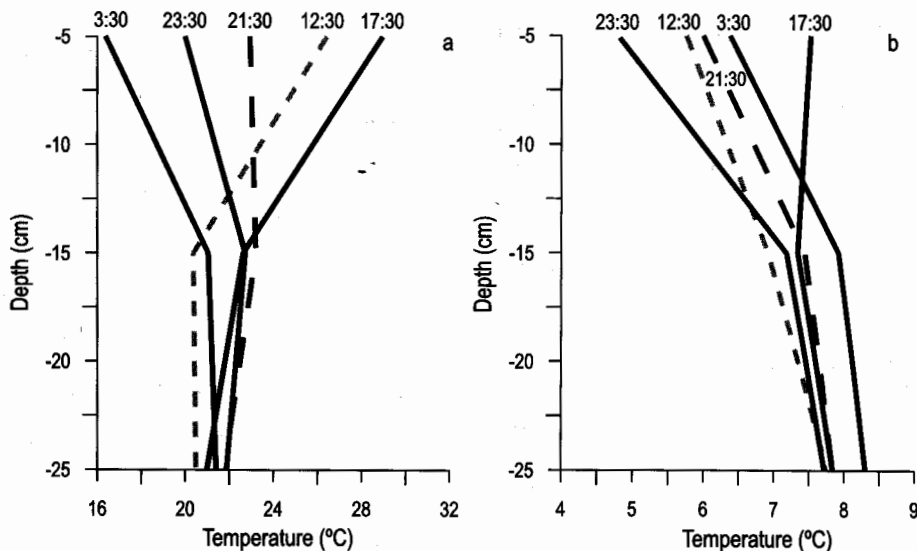
(approximately). During the hours of flood tide, the curve showed two relative maximums, indicating that soil was receiving heat from the water. On 1 July the temperature wave at –5 cm presented a more extended maximum that lasted about 5.5 h (from 14:30 to 20:00). The heat transfer from water to soil during tidal inundation was the probable cause.

Sediment temperature vertical profiles (fig. 3) showed a diurnal and semidiurnal cycle due to the atmospheric and tidal influence. The main fluctuations of sediment temperature were found in the first 15 cm. Below this layer, temperature presented a smaller gradient with depth, with a daily mean amplitude (at –25 cm) of 1.4°C on 20 February and 0.66°C on 1 July. When tidal flats were exposed to solar radiation, especially at midday and early afternoon, important vertical gradients developed in the upper 15 cm, reaching mean values of 0.82°C cm⁻¹ during the summer day. During the night hours, a profile inversion was observed. However, on the winter day, due to the important reduction of solar radiation (about half at midday) and light hours, significant thermal gradients were not recorded at noon. Higher temperatures at depth than on the surface were observed, which indicates that the soil was cooling as it was exposed to a cold atmospheric layer.

The diurnal amplitude at –5 cm was 14.6°C on 20 February and only 2.8°C on 1 July. The contrast in the sediment

fueron mayores. Debido a la radiación solar, la onda térmica de la capa de sedimento superficial mostró un máximo absoluto aproximadamente entre 14:00 y 17:30. Durante las horas de inundación mareal la curva mostró dos máximos relativos, indicando una transferencia de calor desde el agua hacia el suelo. El 1° de julio la onda de temperatura a 5 cm de profundidad presentó un máximo que se prolongó por aproximadamente 5.5 h (desde las 14:30 hasta las 20:00). La causa probable de la extensión del máximo fue la transferencia de calor desde el agua hacia el suelo que se produjo durante la inundación de la marea.

Los perfiles verticales de la temperatura del sedimento (fig. 3) mostraron un ciclo diurno y semidiurno dado por la influencia de la atmósfera y de la marea. Las mayores fluctuaciones en la temperatura del sedimento se observaron en los primeros 15 cm. Debajo de esta capa la temperatura presentó un menor gradiente con respecto a la profundidad, con una amplitud diaria promedio (a –25 cm) de 1.4°C el 20 de febrero y de 0.66°C el 1° de julio. En los 15 cm superiores de sedimento se desarrollaron importantes gradientes verticales, especialmente a mediodía y en las primeras horas de la tarde, cuando las planicies estuvieron expuestas a la radiación solar. Dichos gradientes alcanzaron valores medios de 0.82°C cm⁻¹ durante el día de verano. Durante las horas nocturnas se

**Figure 3.** Temperature vertical profiles in sediments at Puerto Cuatrerros tidal flats: (a) 20 February 2000; (b) 1 July 2000.**Figura 3.** Perfiles verticales de temperatura en sedimentos de las planicies mareales de Puerto Cuatrerros: (a) 20 de febrero de 2000; (b) 1° de julio de 2000.

temperature conditions between both seasons was also evident in the profile shape (fig. 3). While a typical summer day presented a funnel-shaped profile, a winter day remained at an almost constant vertical profile inversion that was reduced towards 15:30–17:30, the time at which the tidal flat was flooded and water infiltration through the sediment interstices acted as a heat transfer mechanism.

Soil heat flux

Heat flows through the sediment by thermal conduction and the rate of heat flux depends on the strength of the mean temperature gradient and the ability of the particular soil to transmit heat (soil thermal conductivity) (Oke, 1978). By convention, soil heat flux is positive when it moves downwards (heat gain) and negative when the circulation is upwards (heat loss). In this investigation, the biggest temperature fluctuations were observed between 5 and 15 cm depth, so this layer was selected in order to assess the sediment heat flux. The equation used to calculate the soil heat flux considered the following data:

- Temperature gradient ($\Delta T/\Delta Z$). Although temperature gradient was measured at a depth of -5 and -15 cm, it is necessary to take into account the sediment-air temperature gradient. On 20 February, the temperature gradient between the sediment upper layer (-0.05 m) and the air (3 m) was mainly around 4°C or 5°C , reaching almost 9°C at 10:40 (absolute values); however, on 1 July the difference was only 1°C or 2°C during most of the day. Obviously, these conditions had an influence on the heat flux through the study layer, resulting in a considerably larger heat flux on 20 February than on 1 July (fig. 4).
- Thermal conductivity (λ). Thermal conductivity values were $1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ on 20 February and $0.79 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ on 1 July. According to the granulometry of the tidal flat sediments (table 1), heat capacity was estimated as a mean value of saturated clay and saturated sand heat capacities (Oke, 1978), resulting in $3.03 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$. Thermal diffusivity, which varies with periodic changes of temperature and soil moisture content, was estimated at $3.31 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and $2.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for 20 February and 1 July, respectively. This range of values was similar to those estimated previously by Piccolo and Dávila (1991) in Ingeniero White: $5.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ in summer and $3.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ in winter (monthly mean values).

Figure 4 shows the heat exchange during 20 February, which had its maximum value in the hours of maximum radiation during ebb tide. The tidal influence was also observed in the fast reduction of heat flux during the hours of maximum height, indicating that heat exchange across the sediment-atmosphere interface was greater than across the

observó una inversión del perfil. En el día invernal, sin embargo, debido a la importante reducción de la radiación solar (aproximadamente la mitad de la del verano a mediodía) no se registraron gradientes térmicos significativos durante el mediodía. Se observaron temperaturas más altas en profundidad que en superficie, indicando el enfriamiento del suelo durante su exposición a una capa atmosférica fría.

La amplitud diurna a 5 cm de profundidad fue de 14.6°C el 20 de febrero y de sólo 2.8°C el 1° de julio. El contraste entre las condiciones térmicas del sedimento en verano e invierno también se evidenció en la forma del perfil (fig. 3). Mientras un día de verano típico presentó un perfil en forma de embudo, el día de invierno permaneció con una inversión del perfil vertical casi constante que se redujo hacia las 15:30–17:30, momento en el que la planicie fue inundada y la infiltración del agua a través del sedimento actuó como un mecanismo de transferencia de calor.

Flujo de calor en el suelo

El calor fluye a través del sedimento por conducción térmica y la tasa de flujo de calor depende de la fuerza del gradiente medio de temperatura y la capacidad del suelo en particular para transmitir calor (conductividad térmica del suelo) (Oke, 1978). Por convención el flujo de calor en el suelo es positivo cuando circula hacia abajo (ganancia de calor) y negativo cuando circula hacia arriba (pérdida de calor). En esta investigación las mayores fluctuaciones de temperatura se observaron entre los 5 y 15 cm de profundidad, por lo que se seleccionó esta capa para el cálculo del flujo de calor a través del suelo. La ecuación utilizada para calcular el intercambio de calor consideró los siguientes datos:

- Gradiente térmico ($\Delta T/\Delta Z$). Aunque se registró el gradiente de temperatura entre las profundidades de 5 y 15 cm, debe tomarse en cuenta asimismo el gradiente de temperatura sedimento-aire. En el día de verano el gradiente térmico entre el sedimento superficial (a -0.05 m) y el aire (3 m) se mantuvo principalmente alrededor de los 4°C ó 5°C , alcanzando aproximadamente los 9°C a las 10:40. El 1° de julio la diferencia fue sólo de 1°C ó 2°C durante casi la totalidad del ciclo diario. Obviamente estas condiciones ejercieron una influencia sobre el intercambio de calor a través de la capa de sedimento en estudio, dando como resultado un flujo considerablemente mayor durante el día de febrero que durante el 1° de julio (fig. 4).
- Conductividad térmica (λ). Los valores de conductividad térmica fueron $1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ el día 20 de febrero y $0.79 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ el 1° de julio. De acuerdo con la granulometría de los sedimentos de las planicies de marea (tabla 1), la capacidad calorífica se estimó como un promedio de las capacidades caloríficas de la arcilla y arena saturadas (Oke1978), cuyo resultado fue $3.03 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$. La difusividad térmica, que varía con los cambios periódicos de temperatura y de contenido de humedad en el

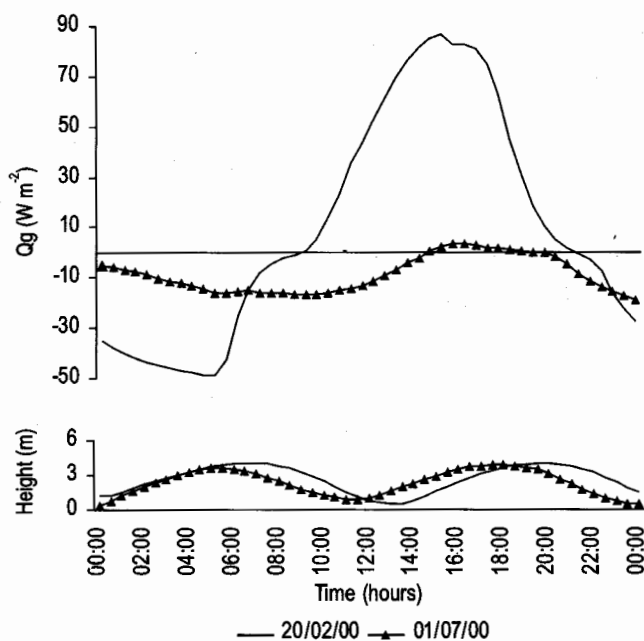


Figure 4. Soil heat flux at Puerto Cuatreros tidal flats during typical summer and winter days.

Figura 4. Flujo de calor en el sedimento de las planicies mareales de Puerto Cuatreros durante días típicos de verano e invierno.

sediment-water interface during the summer day, mainly due to the difference between water temperature and air temperature in the same conditions.

A net gain or storage of heat in the soil was shown by the prevailing positive values of flux on 20 February (diurnal heat balance of 840.6 kJ m^{-2}). On the contrary, during the winter day a net loss was observed, with a total heat exchange of -768.6 kJ m^{-2} . Positive values were small and only observed between 14:30 and 19:00, during tidal inundation.

In summary, the analysis of diurnal temperature variations and soil heat balance indicates that solar radiation and tides were factors that regulated the shape of the heat flux in the tidal flats. The season appeared to have determined the general direction of heat flux through sediment, resulting in a net gain during summer and a net loss in winter.

Although this is a preliminary study, the analysis of the soil thermal behavior shows that the ecosystem experiences important variations throughout the year. Hence, the next step will be to analyze the relationship between this annual heat variation in the sediment and the biodiversity of the tidal flats.

References

- Arango, J.M. (1985). Distribución de parámetros oceanográficos en el estuario de Bahía Blanca. Tesis de Licenciatura en Física, Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 60 pp.
- Harrison, S.J. and Phizacklea, A.P. (1984). Thermal properties of muddy intertidal sediments. Univ. of Stirling. IMRP Rep. No 7, 12 pp.

suelo, se estimó en $3.31 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y en $2.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para los días 20 de febrero y 1° de julio, respectivamente. Estos son comparables con los estimados previamente por Pícolo y Dávila (1991) en Ingeniero White: $5.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el verano y $3.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el invierno (promedios mensuales).

La figura 4 muestra el intercambio de calor durante el 20 de febrero. El máximo valor se produjo durante la bajamar y en las horas de máxima radiación. La influencia mareal durante el día de verano se observó además en la rápida reducción del flujo de calor durante las horas de mayor altura de marea. Esto indica que el intercambio de calor sedimento-atmósfera fue mayor que el que se produjo entre el sedimento y el agua, debido principalmente a la diferencia de temperatura entre el agua y el aire en condiciones similares.

Los valores predominantemente positivos de flujo de calor durante el 20 de febrero resultaron en una ganancia neta o almacenamiento de calor en el suelo de 840.6 kJ m^{-2} . Contrariamente, durante el día de invierno se observó una pérdida neta de -768.6 kJ m^{-2} . Los valores positivos fueron bajos y sólo se observaron entre 14:30 y 19:00, durante la inundación de la marea.

En síntesis, el análisis de las variaciones de temperatura diurnas y el balance de calor en el suelo indica que la radiación solar y las mareas fueron factores que regularon el flujo de calor en las planicies mareales. La estacionalidad probablemente determinó la dirección general del flujo de calor a través del sedimento, dando como resultado una ganancia neta durante el verano y una pérdida neta en invierno.

Aunque éste constituye un estudio preliminar, el análisis del comportamiento térmico del sedimento demuestra que el ecosistema experimenta variaciones importantes a lo largo del año. Por lo tanto, las próximas temáticas a ser analizadas serán las relaciones existentes entre esta variabilidad anual de calor en el sedimento y la biodiversidad de las planicies de marea.

Traducido al español por los autores.

- Harrison, S.J. and Phizacklea, A.P. (1985). Seasonal changes in heat flux and heat storage in the intertidal mudflats of the Forth Estuary, Scotland. *J. Climatol.*, 5: 473-485.
- Harrison, S.J. and Phizacklea, A.P. (1987a). Vertical temperature gradients in muddy intertidal sediments in the Forth Estuary, Scotland. *Limnol. Oceanogr.*, 32(4): 954-963.
- Harrison, S.J. and Phizacklea, A.P. (1987b). Temperature fluctuation in muddy intertidal sediments, Forth Estuary, Scotland. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 24: 279-288.
- Heath, R.A. (1977). Heat balance in a small coastal inlet. Pauatahanui Inlet, North Island, New Zealand. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 5: 783-792.
- Kjerfve, B. (1978). Diurnal energy balance of a Caribbean barrier reef environment. *Bull. Mar. Sci.*, 28(1): 137-145.
- Monteith, J.L. (1973). *Principles of Environmental Physics*. American Elsevier, New York, 241 pp.

- Oke, T.R. (1978). *Boundary Layer Climates*. Methuen, London, 372 pp.
- Perillo, G.M. and Píccolo, M.C. (1991). Tidal response in the Bahía Blanca estuary, Argentina. *J. Coast. Res.*, 7: 437.
- Perillo, G.M. and Píccolo, M.C. (1999). Geomorphological and physical characteristics of the Bahía Blanca estuary, Argentina. In: G.M. Perillo, M.C. Píccolo and M. Pino-Quivira (eds.), *Estuaries of South America: Their Geomorphology and Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 195–216.
- Perillo, G.M., Arango, J.M. y Píccolo, M.C. (1987). Parámetros físicos del estuario de Bahía Blanca, período 1967–1986. Instituto Argentino de Oceanografía, Reporte Técnico, 250 pp.
- Perillo, G.M., Píccolo, M.C., Parodi, E. and Freije, R.H. (2000). The Bahía Blanca estuary, Argentina. In: U. Seeliger and B. Kjerfve (eds.), *Coastal Marine Ecosystems of Latin America: Ecological Studies*. Vol. 144. Springer-Verlag, Berlin, pp. 205 – 217.
- Píccolo, M.C. and Perillo, G.M. (1990). Physical characteristics of the Bahía Blanca estuary (Argentina). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 31: 303–317.
- Píccolo, M.C. y Dávila, P.M. (1991). El campo térmico de las planicies de marea del estuario de Bahía Blanca. *Actas de las Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Mar del Plata*, pp. 11–15.
- Píccolo, M.C., Perillo, G.M. y Arango, J.M. (1987). Hidrografía del estuario de Bahía Blanca, Argentina. *Geofísica*, 26: 75–89.
- Píccolo, M.C., Perillo, G.M. and Daborn, G.R. (1993). Soil temperature variations on a tidal flat in Minas Basin, Bay of Fundy, Canada. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 35: 345–357.
- Sequeira, M.E. y Píccolo, M.C. (1985). Predicción de la temperatura del agua durante la bajante de la marea en Ingeniero White. *Meteorológica*, 15: 59–76.
- Serman, D.D. (1985). Características de la marea en Bahía Blanca. *Bol. Centro Naval*, 103: 51–74.