



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas  
Programa de Doctorado en Oceanografía



**Variabilidad diurna del viento y condiciones hidrográficas como determinantes del transporte y patrones de asentamiento de larvas de invertebrados bentónicos en la Bahía de Cartagena – Chile central.**

Tesis para optar al grado de Doctor en Oceanografía

JESSICA BONICELLI PROAÑO  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2014

Profesor Guía: Fabián Tapia Jorquera  
Depto. de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas  
Universidad de Concepción

Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado

La Tesis de “*Doctorado en Oceanografía*” titulada “Variabilidad diurna del viento y condiciones hidrográficas como determinantes del transporte y patrones de asentamiento de larvas de invertebrados bentónicos en la bahía de Cartagena – Chile central”, de la Srta. *Jessica Bonicelli Proaño* y realizada en la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente Comisión de Evaluación:

Dr. Fabián Tapia  
Profesor Guía  
Universidad de Concepción

-----

Dr. Marcus Sobarzo  
Profesor Co-guía  
Universidad de Concepción

-----

Dr. Carlos Moffat  
Miembro Comité de Tesis  
Universidad de Concepción

-----

Dr. Sergio Navarrete  
Miembro Comité de Tesis  
Pontificia Universidad Católica de Chile



-----

Dr. Bernardo Broitman  
Evaluador Externo  
Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas

-----

Dr. Rubén Escribano  
Director  
Programas de Postgrados en Oceanografía  
Universidad de Concepción

-----

*Para mi Familia*



## AGRADECIMIENTOS

El término de mi tesis doctoral me ha brindado una gran satisfacción y un gran orgullo personal. Sin embargo este trabajo no habría sido posible sin la participación de personas e instituciones que estuvieron apoyándome durante todo el desarrollo de mi tesis.

Quiero agradecer de manera muy especial a mi profesor guía y gran amigo, el Dr. Fabián Tapia. Sus enseñanzas y apoyo incondicional me han ayudado mucho en el desarrollo de mi tesis doctoral y en mi formación como científica. También quiero agradecerle por haberme facilitado siempre los medios necesarios para realizar los trabajos de terreno y laboratorio.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Sergio Navarrete por haberme permitido desarrollar mi tesis en la Estación Costera de Investigaciones Marinas y facilitado todas las herramientas y equipos necesarios para llevar a cabo los trabajos de terreno y laboratorio durante mi estadía en las Cruces.

Mi más grato agradecimiento a Cristina Stuardo, Bryan Bularz, Hagen Buck-Wiese, Sebastien Lachambre, María Jesús Gálvez, José Pantoja, al Dr. Randy Finke y Ricardo Calderón por haberme apoyado en terreno. También le agradezco a Cristina Stuardo por haber aportado en la interpretación y discusión de los resultados.

Un agradecimiento muy especial al Dr. John Largier, un reconocido científico y una gran persona, que enriqueció mucho mi trabajo con sus valiosas ideas y comentarios.

Les agradezco a los miembros de mi comisión, el Dr. Sergio Navarrete, el Dr. Carlos Moffat y el Dr. Marcus Sobarzo, y al evaluador externo, el Dr. Bernardo Broitman, por sus valiosos aportes, comentarios y correcciones en la tesis.

Mi más grato agradecimiento al director del programa, el Dr. Rubén Escibano, a la Sra. Fabiola Gaete y a la Sra. Mónica Sorondo por su constante ayuda durante mi permanencia en el programa de doctorado.

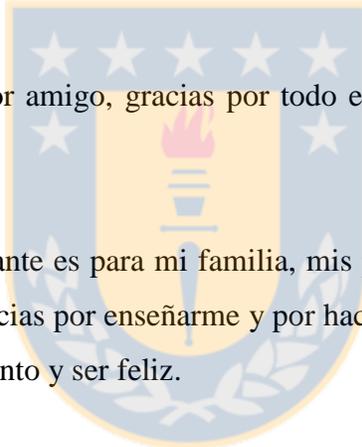
A la Universidad de Concepción y al Programa de Postgrado en Oceanografía por la excelente formación profesional que me brindaron.

Quisiera agradecer a la Beca MECESUP (UCO-0602) y al programa COPAS Sur- Austral (PFB-31) por haberme financiado los estudios de doctorado y apoyado económicamente en los trabajos de terreno.

A mis más queridos amigos con los que he compartido durante mi estadía en Chile y que de alguna u otra forma me han ayudado a culminar esta gran etapa de mi vida. Cristina, Jonathan, Valentina, Silvana, Cynthia, Dharma, Javier, Daniela, Ivonne, Paula, Gaby y Jenna, gracias por su compañía, cariño y buena onda.

A Bryan, mi pareja y mi mejor amigo, gracias por todo el cariño que me das y por todo tu apoyo.

El agradecimiento más importante es para mi familia, mis padres Tito y Rosalia, mi hermano Tito y mi sobrino Vittorio. Gracias por enseñarme y por hacerme recordar siempre que la vida se trata de disfrutar cada momento y ser feliz.



## *Curriculum Vitae*

Jessica Bonicelli Proaño

Nacida el 7 de Diciembre, 1981, en Lima, Perú

1999 - 2008: Grado de Bachiller (Título de biólogo y grado de Bachiller en Ciencias), Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

2009 - 2014: Doctor en Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile.

### PUBLICACIONES

Bonicelli, J., López, D., Ochoa, N., Shreeve, R. S. 2008. Zooplankton community structure and its association with the phytoplankton and water masses from the Bransfield Strait and Elephant Island during austral summer 2006. *Ecología Aplicada*. 7: 159 – 164.

Bonicelli, J., Moffat, C., Navarrete, S. A., Largier, J. L., Tapia, F. J. 2014. Spatial differences in thermal structure and variability within a small bay: Interplay of diurnal winds and tides. *Continental Shelf Research*. 88: 72 – 80.

Bonicelli, J., Tapia, F. J., Navarrete, S. A. 2014. Wind-driven diurnal temperature variability across a small bay and the spatial pattern of intertidal barnacle settlement. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 461: 350 - 356.

### ÁREAS DE INVESTIGACIÓN

Acoplamiento físico biológico; Dispersión de larvas de invertebrados marinos y su relación con los procesos físicos costeros; Acoplamiento bentónico pelágico; Ecología del zooplancton marino.

## EXPERIENCIA DOCENTE

Ayudante cursos de pregrado:

- Fundamentos de la investigación científica, Universidad de Concepción, Chile, 2<sup>do</sup> semestre 2009.
- Biometría, Universidad de Concepción, Chile, 1<sup>er</sup> semestre 2010.
- Acoplamiento Físico Biológico, Universidad de Concepción, Chile, 2<sup>do</sup> semestre 2010.
- Acoplamiento Físico Biológico, Universidad de Concepción, Chile, 1<sup>er</sup> semestre 2013.
- Acoplamiento Físico Biológico, Universidad de Concepción, Chile, 1<sup>er</sup> semestre 2014.

## CRUCEROS OCEANOGRÁFICOS

- BIO Olaya, Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Perú, 2005.

## CAMPAÑAS DE MUESTREO OCEANOGRÁFICO COSTERO

- Crucero intensivo de 24 horas en la bahía de Cartagena. La embarcación ILAN de la Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM). Chile. 17 de Febrero de 2011.
- Muestreo submareal e intermareal de plancton costero y monitoreo de variables físicas. Bahía de Totalillo Norte. Chile. Noviembre de 2013.

## ESTADÍAS DE INVESTIGACIÓN O ENTRENAMIENTO

- Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM), Dr. Sergio Navarrete, Chile, 2011 al 2013.

## BECAS

2009 – 2012: Beca MECESUP (UCO-0602).

2013 – 2014: Beca del programa COPAS Sur- Austral (PFB-31).

## Índice de Contenidos

Resumen .....	i
Abstract .....	iii
1.- INTRODUCCION	
1.1. La circulación en la plataforma interior .....	1
1.2. El viento en periodo diurno y su efecto en la circulación del océano .....	3
1.3. Ciclos de vida complejos y dinámica de poblaciones .....	5
2.- HIPOTESIS Y OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	10
3.- MATERIAL Y METODOS	
3.1 Zona de estudio .....	11
3.2 Observaciones .....	13
3.3 Procesamiento y análisis de la información .....	15
4.- RESULTADOS	
4.1. Capítulo 1. Diferencias espaciales en la estructura térmica dentro de una bahía: el efecto del viento diurno y la marea semi-diurna .....	19
4.2. Capítulo 2. Forzamiento del viento sobre la variabilidad diurna de la temperatura y el patrón espacial del asentamiento de cirripedios intermareales dentro de una bahía .....	29
5.- DISCUSION .....	37
6.- CONCLUSIONES .....	46
7.- REFERENCIAS .....	47

## Resumen

Variabilidad diurna del viento y condiciones hidrográficas como determinantes del transporte y patrones de asentamiento de larvas de invertebrados bentónicos en la Bahía de Cartagena – Chile central.

Jessica Bonicelli Proaño

Programa de Doctorado en Oceanografía  
Universidad de Concepción, 2014

Dr. Fabián Tapia, Profesor Guía

Dr. Marcus Sobarzo, Profesor Co-guía

La bahía de Cartagena es una bahía pequeña ubicada en la costa de Chile central (33°30'S) entre dos importantes centros de surgencia: Punta Curaumilla por el norte y Punta Toro por el sur. Al igual que otras bahías que se encuentran inmersas en regiones de surgencia costera, presenta mayores temperaturas en superficie que localidades de costa abierta, y exhibe una columna de agua altamente estratificada. Trabajos anteriores han demostrado que el efecto combinado del viento diurno y el calentamiento solar modulan las fluctuaciones diurnas de temperatura en el extremo norte de esta bahía. Estas fluctuaciones de temperatura tienen un rango comparable al rango estacional observado para esta área de la costa chilena. En este estudio se comparó la estructura térmica de la columna de agua entre los extremos de la bahía de Cartagena, separados por sólo 6 km de distancia, bajo distintas condiciones de viento. Además se evaluó la asociación entre el patrón espacial de asentamiento larval en tres especies de cirripedios intermareales (*Jehlius cirratus*, *Notochthamalus scabrosus* y *Notobalanus flosculus*) y el patrón de variabilidad del viento. Los resultados muestran que las fluctuaciones diurnas (i.e. periodo de 24 h) de temperatura superficial difieren sustancialmente entre los extremos de la bahía. En el extremo sur, menos expuesto al viento, la señal diurna resultó ser más débil que en el extremo norte, más expuesto al viento. En cuanto a la estratificación térmica de la columna de agua, en el extremo sur ésta persiste durante todo el día, mientras que en el extremo norte la columna de agua está menos estratificada y presenta una fuerte se-

ñal diurna, asociada a la brisa marina que se manifiesta en esta zona con mayor intensidad durante la tarde en meses de primavera-verano. La señal semi-diurna, en tanto, predomina en toda la columna de agua en el extremo sur y sólo en las capas más profundas en el extremo norte de la bahía. Estos resultados sugieren que la diferencia espacial en la variabilidad de la estructura térmica se debe a una combinación de factores físicos que ocurren a diferentes escalas temporales, tales como la circulación asociada a la surgencia costera, y el transporte de agua superficial cálida hacia la costa en el extremo norte de la bahía, mediado por la brisa marina. Mientras que el flujo costero hacia el norte forzado por el viento genera una mayor retención de agua superficial cálida y una columna de agua más estratificada en el extremo más protegido del viento, en el extremo norte se observan cambios entre agua fría de surgencia en la mañana y agua cálida transportada hacia la costa por la brisa marina durante la tarde. Esta heterogeneidad espacial en la variabilidad diurna de la temperatura se acentúa en días con viento intenso. Bajo esta condición de viento la señal diurna de la temperatura superficial se atenúa en el extremo sur, y se desacopla de lo observado en el extremo norte. Esto sugiere que viento más intenso produce un mayor gradiente espacial en los mecanismos físicos que transportan larvas hacia la costa. En cuanto al asentamiento de larvas de cirripedios en la bahía, se observaron mayores tasas de asentamiento de los chthamalidos *J. cirratus* y *N. scabrosus* en el extremo norte, mientras que el balánido *N. flosculus* presentó mayor asentamiento en el extremo sur. En condiciones de viento fuerte, las tasas de asentamiento de *J. cirratus* y *N. scabrosus* disminuyeron en los dos sitios del norte, y fueron mínimas en los tres sitios para *N. flosculus*. Por otro lado, el efecto del viento sobre el patrón espacial del asentamiento fue diferente entre especies. Sólo para *J. cirratus* se observó una correlación positiva y significativa entre la heterogeneidad espacial del asentamiento y la intensidad de la brisa marina. En este estudio se concluye que los cambios diarios en el stress de viento tienen un fuerte y consistente efecto sobre el patrón espacial de las fluctuaciones diurnas de temperatura del agua y sobre el patrón espacial del asentamiento de cirripedios en la bahía de Cartagena. Estos resultados sugieren que dicha asociación surge del efecto del viento sobre la circulación local y, por extensión, sobre los mecanismos que determinan el transporte de larvas en esta y otras bahías con características similares que se encuentran en regiones de surgencia.

## Abstract

Diurnal wind and hydrographic variability as forcing mechanisms for the transport and settlement patterns of benthic invertebrate larvae in the Bay of Cartagena – central Chile.

Jessica Bonicelli Proaño

Programa de Doctorado en Oceanografía  
Universidad de Concepción, 2014

Dr. Fabián Tapia, Profesor Guía

Dr. Marcus Sobarzo, Profesor Co-guía

Cartagena Bay is a small embayment located in central Chile ( $33^{\circ}30'S$ ), and flanked by two coastal upwelling centers: Punta Curaumilla to the north and Punta Toro to the south. As in other bays embedded in upwelling regions, it exhibits higher surface temperatures and a more strongly stratified water column than neighboring open-coast localities. It has been shown that large diurnal fluctuations in surface temperatures at the northern end of this bay are modulated by a combination of diurnal winds (i.e. sea breeze) and solar heating. These temperature fluctuations are comparable with the seasonal range observed for this part of the Chilean coast. In this study, the thermal structure of the water column was compared between the extremes of Cartagena bay, which are ca. 6 km apart, under different wind conditions. The association between wind variability and the spatial pattern of settlement in three species of intertidal barnacles (*Jehlius cirratus*, *Notochthamalus scabrosus*, *Notobalanus flosculus*) was also examined. Results of this investigation show that diurnal fluctuations (i.e. 24 h cycles) in surface temperature differ substantially between extremes of the bay. At the southern end, sheltered from the wind, the diurnal signal is weaker than at the northern end, which is more exposed to the wind. Thermal stratification of the water column persists throughout the day at the southern end, whereas at the northern end it is weaker and exhibits a strong diurnal signal, which is associated with the afternoon sea breeze that develops in this area during spring and summer months. A semi-diurnal signal in temperature variability was dominant throughout the

water column at the southern end, but it was only detected near the bottom at the northern end. These results suggest that spatial differences in thermal variability result from a combination of physical phenomena taking place over different temporal scales, such as upwelling-driven coastal flows, and the sea breeze driven onshore transport of warm surface water at the northern end of the bay. While the strong upwelling-favorable winds enhance the retention of warm surface water and a stronger thermal stratification at the sheltered southern end of the bay, at the wind-exposed northern end there is a diurnal change from cold upwelling water in the morning hours to warm surface water pushed onshore the afternoon sea breeze. This spatial heterogeneity in diurnal temperature variability is accentuated on days with stronger winds. Under such conditions, the diurnal signal in surface temperature at the southern end is attenuated and decoupled from the northern end. This suggests that stronger winds produce a stronger spatial gradient in the physical mechanisms that mediate the onshore transport of planktonic larvae. As for the settlement of intertidal barnacle larvae across the bay, mean settlement rates of *J. cirratus* and *N. scabrosus* were higher at the northern end, whereas *N. flosculus* settled at higher rates at the southern end. Under strong wind conditions, settlement rates of *J. cirratus* and *N. scabrosus* decreased at the northern sites, and reached their minima at all three sites for *N. flosculus*. The effect of wind stress on the spatial pattern of settlement across the bay differed between species. A significant and positive correlation between the spatial heterogeneity of settlement and sea breeze intensity was found only for *J. cirratus*. It is concluded that daily changes in wind stress have a strong effect on the spatial pattern of diurnal temperature fluctuations and on the spatial pattern of barnacle settlement around the bay. These results suggest that such association emerges from the effect of wind on local nearshore circulation and, by extension, on the dominant mechanisms driving larval transport in this and other bays embedded in upwelling regions.

## 1.- INTRODUCCIÓN

### 1.1. *La circulación en la plataforma interior*

La plataforma interior es el área comprendida entre la zona de rompiente y el límite con la plataforma media que es donde las capas de Ekman superficial y de fondo se mezclan (Lentz 1995). La posición de este límite puede variar en el tiempo y en el espacio, lo cual depende de la profundidad, el patrón del viento, la estratificación de la columna de agua, y el espesor de las capas de Ekman superficial y de fondo (e.g. Austin & Lentz 2002, Fewings *et al.* 2008). La circulación en la plataforma interior es compleja, y está fuertemente influenciada por la interacción de múltiples factores físicos de escala local, tales como el viento costero, la topografía y batimetría, corrientes de marea, ondas internas, y olas de superficie (Sobarzo & Djurfeldt 2004, Woodson *et al.* 2007, Lentz *et al.* 2008, Fewings *et al.* 2008, Sobarzo *et al.* 2010, Lentz & Fewings 2012). Además, está modulada por procesos físicos de mayor escala como la surgencia costera (Austin & Lentz 2002, Kirincich *et al.* 2005, Roughan *et al.* 2005a, 2005b).

Los mecanismos físicos que generan transporte perpendicular a la costa en la plataforma interior difieren de los que generan transporte en la plataforma media. Mientras que en la plataforma media los vientos hacia el Ecuador son el principal forzante del transporte perpendicular a la costa mediante el transporte de Ekman, en la plataforma interior el viento perpendicular a la costa es más efectivo en generar transporte en esa dirección (Lentz & Fewings 2012). Esto ha sido demostrado tanto en sistemas de margen oriental como en sistemas de margen occidental, tales como la costa del noreste de los Estados Unidos (Fewings *et al.* 2008), la costa de Chile central (Sobarzo *et al.* 2010), la costa del sur de California (Cudaback *et al.* 2005) y la costa de Baja California, México (Filonov *et al.* 2014). El estudio de Fewings *et al.* (2008), basado en 6 años de observación continua de viento y corrientes, demostró que el viento perpendicular a la costa promueve la formación de dos capas en la plataforma interior, con una capa superficial transportada a favor de la dirección del viento y una capa más profunda en la dirección opuesta. Asimismo se ha demostrado, mediante un estudio realizado en la costa de Chile, que esta estructura de dos capas también puede generarse en una escala diurna por efecto directo del viento diurno (Sobarzo *et al.* 2010).

Por otro lado los procesos físicos de mayor escala, como la surgencia costera, también pueden modificar la circulación y las condiciones hidrográficas en la plataforma interior. Austin & Lentz (2002) demostraron mediante un modelo numérico que la estratificación en la plataforma interior puede mantenerse durante eventos de surgencia, debido al transporte hacia la costa de agua más densa cerca del fondo. Además estudios observacionales realizados por Roughan *et al.* (2005b) en la bahía de Bodega, en la costa central de California, demostraron que durante periodos de surgencia activa hay una intrusión de agua fría de fondo y la estratificación se mantiene dentro de la bahía. Este mecanismo también ha sido observado en la bahía de Saldanha en la costa de Sudáfrica por Monteiro & Largier (1999).

La importancia relativa de estos procesos físicos que generan transporte perpendicular a la costa en la plataforma interior varía temporal y espacialmente debido a la variabilidad espacial y temporal de la interacción de forzantes oceanográficos y meteorológicos con la topografía local (Cudaback *et al.* 2005). Estas interacciones producen patrones de variabilidad en la circulación y condiciones hidrográficas que pueden afectar de manera muy drástica la advección y transporte perpendicular a la costa de agua y sus propiedades (Kaplan *et al.* 2003), además de partículas en suspensión y plancton (Pineda 2000). Este último grupo incluye a los estadios larvales de numerosas especies de invertebrados bentónicos costeros, cuya distribución, estructura y dinámica poblacional dependen estrechamente del destino de sus larvas en el plancton (Roughgarden *et al.* 1988).

En bahías donde la orientación de la línea de costa cambia abruptamente, el efecto que tiene el viento sobre la circulación y las condiciones hidrográficas es muy diferente a lo que se observa en sistemas de costa abierta. Debido a su topografía y batimetría se generan flujos rotatorios dentro de las bahías y dependiendo de sus dimensiones es posible observar más de un giro (Valle- Levinson *et al.* 2000, Parada *et al.* 2001, Valle-Levinson & Moraga-Opazo 2006). Estos patrones de circulación hacen que estos sistemas costeros semicerrados sean altamente productivos y con altas abundancias de zooplancton (Castilla *et al.* 2002).

En bahías que se encuentran a sotavento de centros de surgencia, tales como la bahía de Monterey en California (a la sombra de Punta Año Nuevo) y la bahía de Cartagena en Chile central (a la sombra de Punta Toro), se configura un tipo de estructura hidrográfica durante la surgencia que ha sido denominada “sombra de surgencia” (Graham *et al.* 1992, Graham 1993, Graham & Largier 1997). En la bahía de Monterey (Graham & Largier 1997), esta estructura se manifiesta en el extremo norte, más protegido del viento, donde se observa retención de agua superficial. Estudios recientes (Woodson *et al.* 2007, Suanda *et al.* 2011) han demostrado que en esta zona de retención los patrones de circulación diurna modifican la estructura térmica de la columna de agua durante el día y que son principalmente modulados por el viento a escala diurna.

### 1.2. *El viento en periodo diurno y su efecto en la circulación del océano*

El viento en periodo diurno, a menudo llamado brisa marina, es un fenómeno meteorológico común en la costa (Rosenfeld 1988, Pattiaratchi 1997, Sobarzo *et al.* 2010), que ocurre a lo largo de las dos terceras partes de las costas y puede manifestarse más allá de los 200 km mar adentro (Gille *et al.* 2003). Debido a que la tierra tiene un calor específico menor que el agua, el continente gana y pierde calor más rápido que el océano, lo que genera un gradiente de presión atmosférica costa-océano, que da origen a un sistema de brisas en dirección perpendicular a la costa (Abbs & Physick 1992). La brisa normalmente comienza durante la mañana, algunas horas antes del mediodía. En el día sopla hacia el continente, lo que se conoce como la brisa marina, y en la noche sopla hacia el océano, lo que se conoce como brisa de tierra (Abbs & Physick 1992). Estacionalmente, este fenómeno se presenta con mayor intensidad en meses de primavera y verano, cuando el gradiente térmico entre el océano y el continente es más pronunciado. La variabilidad topográfica de la línea de costa puede afectar el desarrollo de la brisa. Por ejemplo en bahías y golfos, donde la orientación de la línea de costa cambia abruptamente, es normal encontrar más de un sistema de brisas. Un tipo de brisa es producido por el gradiente térmico entre el continente y el mar, y otro tipo se produce por el gradiente térmico entre el agua de la bahía y otros puntos en la costa (Abbs & Physick 1992).

La importancia de la brisa como proceso atmosférico costero ha conducido al desarrollo de numerosas investigaciones acerca de su efecto sobre la circulación del océano costero, y particularmente en la plataforma interior (Rosenfeld 1988, Masselink & Pattiaratchi 1998, Pattiaratchi *et al.* 1997, Lerczak *et al.* 2001, Hyder *et al.* 2002, Simpson *et al.* 2002, Rippeth *et al.* 2002, Kaplan *et al.* 2003, Tapia *et al.* 2004, Piñones *et al.* 2005, Woodson *et al.* 2007, Hendrickson & MacMahan 2009, Sobarzo *et al.* 2010). En el golfo de Thermaikos, al noroeste del mar Egeo, Hyder *et al.* (2002) demostraron que la brisa marina puede forzar el desarrollo de corrientes diurnas rotatorias en la capa superficial por encima de la pycnoclina. En la bahía de Monterey, California, se ha demostrado que la brisa puede producir surgencia local de periodo diurno (Woodson *et al.* 2007). En latitudes medias (ca. 30° de latitud) la brisa puede provocar el desarrollo de corrientes baroclínicas (Lerczak *et al.* 2001), forzar flujos inerciales (Aguar-González *et al.* 2011) y mediar el transporte hacia la costa de agua superficial, plumas de río y sedimento (Pattiaratchi *et al.* 1997, Kaplan *et al.* 2003, Piñones *et al.* 2005). Estudios recientes en la costa de Chile central (Sobarzo *et al.* 2010) han documentado el efecto de la brisa sobre la circulación diurna en la plataforma interior, demostrando que ésta puede generar corrientes con movimiento rotatorio anti-horario en función de la profundidad, y explicar hasta un 40% de la variabilidad en las corrientes horizontales en la plataforma interior. En las bahías de Cartagena y Antofagasta, Kaplan *et al.* (2003) determinaron que las fluctuaciones diurnas de temperatura superficial están influenciadas, además del calentamiento solar, por el transporte hacia la costa de agua superficial cálida mediado por la brisa. Por otro lado, Piñones *et al.* (2005) observaron cambios diurnos en la salinidad superficial en el extremo norte de la bahía de Cartagena durante la primavera verano, aparentemente asociados con el transporte hacia la costa - mediado por la brisa - de la pluma del río Maipo.

La importancia relativa del viento diurno como forzante de la variabilidad en las condiciones hidrográficas e hidrodinámicas de la plataforma interior puede variar en el espacio y tiempo, dependiendo de su intensidad, dirección y la topografía de la costa. Por ejemplo, la brisa marina puede transportar agua superficial hacia la costa durante la tarde (Kaplan *et al.* 2003) o generar transporte de Ekman local (Woodson *et al.* 2007), dependiendo de su orientación con respecto al borde costero. Por otro lado, la variación a escala regional en los patrones de radiación solar puede generar cambios en la intensidad e importancia relativa de la

brisa marina como forzante de la variabilidad hidrodinámica e hidrográfica en la plataforma interior. Un estudio comparativo en localidades de la costa de Chile centro-norte demostró que la señal diurna de la temperatura varía entre lugares alejados por cientos de kilómetros, sugiriendo que estas diferencias se deben a diferencias espaciales en la intensidad de la brisa marina (Kaplan *et al.* 2003). Estos cambios espaciales de las condiciones hidrográficas de la plataforma interior, generados por la interacción entre el patrón del viento y la topografía local, pueden determinar cambios espaciales en los procesos hidrodinámicos que determinan el transporte costero de agua y material en suspensión – vivo o inerte –, incluyendo larvas planctónicas de especies bentónicas, y con ello modular el patrón espacial de la llegada y asentamiento de estas larvas en ambientes costeros.

### 1.3. *Ciclos de vida complejos y dinámica de poblaciones.*

La gran mayoría de especies bentónicas tiene en su ciclo de vida una fase larval planctónica. Los estadios larvales son transportados por las corrientes marinas y, luego de sobrevivir y completar su desarrollo en el plancton, se asientan y eventualmente pasan a formar parte de la población adulta. Su transporte y asentamiento en los sistemas costeros dependen fuertemente de la circulación costera y de su interacción con factores biológicos como el comportamiento larval (Roughgarden *et al.* 1988, Poulin *et al.* 2002).

En ausencia de transporte mediado por corrientes, las larvas de invertebrados debiesen permanecer cerca de su población parental y contribuir a la renovación de ésta una vez concluida la fase planctónica. No obstante, al desarrollarse en un ambiente altamente advectivo, las larvas planctónicas serían transportadas por las corrientes lejos de su lugar de origen y contribuirían a la renovación de otras poblaciones (Pulliam 1988, Shanks *et al.* 2003). Conocer hasta qué límite espacial hay intercambio de larvas entre subpoblaciones, referido a menudo como escalas de conectividad, o si una población se auto-sustenta con sus propias larvas, son temas de interés para el diseño de áreas de manejo de recursos pesqueros, áreas protegidas y reservas marinas (Largier 2003, Shanks *et al.* 2003, Gaines *et al.* 2003). Para ello es crítico determinar qué factores físicos y biológicos afectan el transporte y asentamiento de larvas en los ecosistemas costeros, que intervienen en la renovación de poblaciones bentónicas

con larvas planctónicas y modulan su persistencia y sus patrones de distribución espacial. Entre estos factores están la duración del desarrollo larval (Shanks *et al.* 2003, Siegel *et al.* 2008), la mortalidad en el plancton (Morgan 1995), el comportamiento natatorio y patrones de migración vertical (Hill 1998, Poulin *et al.* 2002, Queiroga & Blanton 2005), los procesos físicos que determinan el transporte (e.g. Pfeiffer-Herbert *et al.* 2007), su comportamiento durante el asentamiento (Knight-Jones & Stevenson 1950, Crisp & Barnes 1954, Crisp 1961), presencia de depredadores (Gaines & Roughgarden 1987) y la disponibilidad de alimento y sustrato apropiado para el asentamiento (Pineda 2000).

En las últimas décadas, numerosas investigaciones se han enfocado en estudiar la relación entre forzantes físicos y el transporte y posterior asentamiento de larvas planctónicas. Estos trabajos han identificado fenómenos físicos de escala grande (10 – 100s km), mediana (1 – 10 km) y pequeña (1 – 1000 m) que determinan la llegada de larvas a la costa y pueden generar cambios en los patrones espaciales y temporales del asentamiento, reclutamiento y distribución de adultos (e.g. Pineda 1994, Pineda & López 2002, Broitman *et al.* 2005, Ladah *et al.* 2005, Lagos *et al.* 2005, 2007, 2008, Porri *et al.* 2006).

Gran parte de los esfuerzos de investigación desarrollados hasta la fecha se han centrado en el efecto de fenómenos de meso-escala, principalmente la surgencia costera, sobre la dispersión y patrones de asentamiento larval, así como en su efecto sobre patrones de distribución de especies bentónicas (Roughgarden *et al.* 1988, Farrell *et al.* 1991, Connolly & Roughgarden 1999, Lagos *et al.* 2007, 2008, Morgan *et al.* 2012). La surgencia costera, generada por efecto de vientos hacia el Ecuador en las costas occidentales de los continentes (Brink 1983, Strub *et al.* 1998), o dirigidos hacia el polo en costas orientales (Castelao & Barth 2006), exhibe patrones de variabilidad tanto sinóptica como estacional. Los flujos producidos por la surgencia interactúan con la batimetría y topografía costera, generando una variedad de estructuras hidrodinámicas a escala local y regional (Graham & Largier 1997, Figueroa & Moffat 2000, Letelier *et al.* 2009), que pueden provocar cambios espaciales en el transporte larval y en los patrones de reclutamiento de especies bentónicas en escala de decenas de kilómetros (Lagos *et al.* 2005, 2007, 2008). Estudios desarrollados en la costa de Chile central y en la costa oeste de Estados Unidos han indicado que la surgencia costera

puede modular el patrón espacio-temporal del reclutamiento en escalas de cientos de kilómetros (Connolly *et al.* 2001, Lagos *et al.* 2007).

Por largo tiempo se ha postulado que el transporte de Ekman asociado a la surgencia costera aleja de la costa a las larvas planctónicas de especies bentónicas costeras, e impide que éstas se asienten con éxito. El asentamiento ocurriría sólo cuando una relajación o reversión del viento meridional genera un transporte de larvas hacia la costa (Roughgarden *et al.* 1988, Farrell *et al.* 1991, Connolly & Roughgarden 1999). Sin embargo, se ha demostrado que la dispersión costa afuera de larvas mediada por surgencia costera es menos prevalente de lo que se creía, y que es posible que las larvas de numerosas especies de invertebrados permanezcan cerca de la costa durante todo su desarrollo planctónico (Poulin *et al.* 2002, Shanks & Brink 2005, Tapia & Pineda 2007, Morgan *et al.* 2009, Shanks & Shearman 2009). Por ejemplo, para larvas de decápodos en la costa de California se ha demostrado que, incluso en condiciones de surgencia activa, éstas se concentran en la plataforma interior a menos de 12 km de la costa (Morgan *et al.* 2009). Este patrón de distribución, también observado para larvas de bivalvos y cirripedios en la costa de Oregon (Shanks & Shearman 2009) y para larvas del gastrópodo *Concholepas concholepas* en Chile central (Poulin *et al.* 2002), resultaría de la interacción entre el comportamiento larval, expresado en su distribución vertical en la columna de agua, y mecanismos físicos de escala local que favorecen su retención cerca de la costa. Por esto, es de gran relevancia conocer los factores físicos que modulan la circulación y estructura hidrográfica en la plataforma interior, y evaluar su importancia relativa como determinantes de la llegada de larvas planctónicas a sus lugares de asentamiento en el ambiente bentónico. Junto con el desarrollo y consolidación de los estudios de variabilidad física costera forzada por el proceso de surgencia, se ha prestado cada vez más atención al efecto de procesos físicos de alta frecuencia (periodos de minutos a horas) y menor escala espacial (0.1-10 km) sobre el transporte larval en la plataforma interior, y sobre el patrón espacial de asentamiento larval en ambientes intermareales y submareales (e.g. Kaplan *et al.* 2003, Tapia *et al.* 2004, Vargas *et al.* 2004, Piñones *et al.* 2005, Jacinto & Cruz 2008, Shanks *et al.* 2010). Considerar estos procesos podría contribuir a explicar la variabilidad espacial y temporal del asentamiento en escalas pequeñas, y con ello alcanzar un entendimiento más completo de la combinación de interacciones físico-biológicas que

determinan el transporte y patrón de asentamiento de larvas en ambientes costeros. Aunque aún no se ha demostrado un efecto directo de la brisa marina sobre el transporte de larvas hacia la costa y/o sobre patrones de asentamiento, se ha observado que puede mediar el transporte hacia la costa de material de superficie (Tapia *et al.* 2004), de plumas de ríos (Piñones *et al.* 2005) y de agua cálida en superficie (Kaplan *et al.* 2003), lo cual podría afectar la distribución espacial y tiempos de arribo de larvas a ambientes litorales.

Este estudio se llevó a cabo en la Bahía de Cartagena, cuya orientación (noroeste) y extensión (6 km) permiten desarrollar estudios orientados a evaluar cómo los cambios en la relación entre viento costero y topografía local afectan el transporte de agua, calor y larvas planctónicas, y de esta forma determinan patrones espaciales de asentamiento y, con ello, la renovación de poblaciones bentónicas costeras a la escala de una bahía. Hasta la fecha la mayoría de los trabajos oceanográficos desarrollados en esta bahía se han enfocado en su extremo norte (Kaplan *et al.* 2003, Wieters *et al.* 2003, Piñones *et al.* 2005, Vargas *et al.* 2006) y se conoce muy poco acerca de los patrones hidrográficos e hidrodinámicos en la bahía completa. Un estudio reciente del asentamiento de cirripedios intermareales en esta zona, y que abarcó la bahía completa, reveló que la persistencia del patrón espacial del asentamiento varía interanualmente y sugirió que dicho patrón estaría determinado por cambios interanuales en la orientación del viento costero (Tapia & Navarrete 2010). Debido a su orientación, los extremos de esta bahía difieren sustancialmente en términos de su exposición al viento, por lo que es posible que haya diferencias espaciales en el efecto del viento sobre las condiciones hidrográficas locales. Es probable que la variabilidad física en el extremo sur de la bahía, protegido del viento, esté más fuertemente afectada por otros forzantes físicos como la marea, dominada en esta zona por la componente semi-diurna (Kaplan *et al.* 2003). Además es posible que cambios interdiarios en la intensidad del viento alteren el patrón de circulación en la bahía – manifestado como diferencias espaciales en las condiciones hidrográficas – y, consecuentemente, afecten el transporte de larvas y su patrón de asentamiento en la zona intermareal. En este estudio se plantea evaluar la importancia del viento diurno como determinante de la variabilidad en las condiciones hidrográficas, así como el potencial efecto de los cambios interdiarios en la intensidad del viento sobre el patrón de circulación en la plataforma interior y sus consecuencias para el asentamiento de larvas de invertebrados en la

bahía de Cartagena. En particular, el trabajo desarrollado se centra en el asentamiento larval de tres especies de cirripedios intermareales, las cuales constituyen miembros numéricamente dominantes de la comunidad intermareal tanto en esta bahía como en la costa de Chile central (Navarrete & Castilla 1990).



## 2.-HIPÓTESIS Y OBJETIVOS ESPECIFICOS

### - Hipótesis

Hipótesis1. Existe una respuesta significativa de las condiciones hidrográficas y dinámicas al forzamiento del viento en escala diurna al interior de la bahía de Cartagena.

Hipótesis 2. Cambios interdiarios en la intensidad del viento diurno generan cambios espaciales en la variabilidad diurna de las condiciones hidrográficas y dinámicas al interior de la bahía de Cartagena.

Hipótesis 3. Cambios interdiarios en la intensidad del viento generan cambios en el patrón espacial del asentamiento de larvas de cirripedios en la bahía de Cartagena.

### - Objetivos específicos

Objetivo 1. Caracterizar la variabilidad diurna de la temperatura superficial, la estructura hidrográfica y la circulación en la bahía de Cartagena (H1).

Objetivo 2. Evaluar el rol relativo del viento diurno como forzante de la variabilidad de la temperatura en la bahía de Cartagena (H1).

Objetivo 3. Evaluar el efecto del viento sobre la variabilidad espacial de la temperatura en la bahía de Cartagena (H2).

Objetivo 4. Evaluar el efecto del viento sobre el patrón espacial del asentamiento de larvas de cirripedios en la bahía de Cartagena (H3).

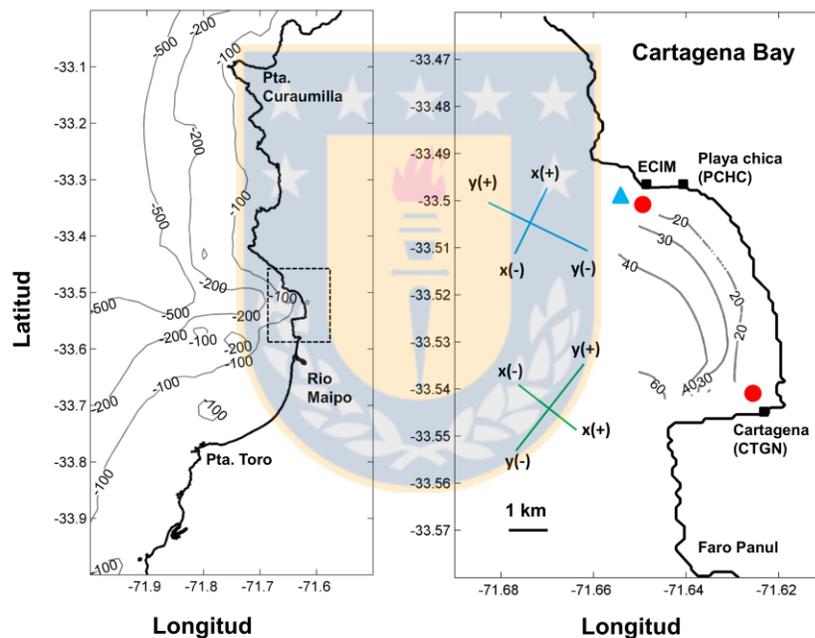
### 3.- MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en la costa de Chile central y es parte del ecosistema de la corriente de Humboldt (Thiel *et al.* 2007). La línea de costa tiene una orientación norte sur y está compuesta por bahías y puntas que modifican la circulación local. Predominan los vientos del sur-oeste durante la primavera verano, que son los responsables de la surgencia costera en la región (Figuroa & Moffat 2000, Narváez *et al.* 2004, Tapia *et al.* 2009), proceso que sostiene una de las regiones más productivas del mundo (Thiel *et al.* 2007). Los vientos con periodo diurno tienen una fuerte influencia sobre la circulación costera en esta zona (Sobarzo *et al.* 2010) y se ha demostrado que son responsables del transporte de agua superficial hacia la costa en la plataforma interior (Kaplan *et al.* 2003, Piñones *et al.* 2005).

Específicamente, este trabajo se realizó en la bahía de Cartagena (33°31.2'S, 71°37.1'O), ubicada en la región de Valparaíso en Chile central (Figura 1). Esta bahía tiene una extensión de 6 km y una orientación hacia el sureste. Al sur de la bahía se ubica la desembocadura del río Maipo. Aunque este río tiene un régimen pluvial, llegando a su máximo caudal en meses de invierno (4000 m<sup>3</sup>/s), la pluma de agua dulce es aún perceptible frente a la bahía de Cartagena durante parte de la primavera-verano y puede ser transportada hacia la costa por efecto de la brisa marina (Piñones *et al.* 2005). Además, la bahía se encuentra entre dos focos de surgencia importantes: Punta Curaumilla por el norte y Punta Toro por el sur (Figura 1). La interacción de la topografía local con los flujos costeros forzados por la surgencia genera condiciones de “sombra de surgencia” (Graham & Largier 1997), que pueden tener implicancias para la retención de agua y plancton dentro de la bahía (Wieters *et al.* 2003, Narváez *et al.* 2004). Al igual que en otras bahías que se encuentran en regiones de surgencia costera en el Pacífico Norte (Graham *et al.* 1992, Graham 1993, Graham & Largier 1997, Roughan *et al.* 2005a, 2005b), la bahía de Cartagena se caracteriza por presentar temperaturas superficiales mayores que aguas abiertas de la costa adyacente, junto con menores concentraciones de macro-nutrientes, y una columna de agua altamente estratificada (Kaplan *et al.* 2003, Narváez *et al.* 2004, Nielsen & Navarrete 2004). Estas

condiciones generalmente favorecen el aumento en biomasa de fitoplancton y el crecimiento, desarrollo y acumulación de larvas de especies marinas en aguas cercanas a la costa (Graham & Largier 1997, Wieters *et al.* 2003, Yannicelli *et al.* 2006). Un estudio realizado en el extremo norte de la bahía mostró fuertes fluctuaciones diurnas de la temperatura que abarcan la mayor parte de la columna de agua (Kaplan *et al.* 2003). Estas fluctuaciones se han atribuido al efecto combinado del calentamiento diurno y la brisa marina, lo cual promueve el transporte hacia la costa y la retención de agua cálida cerca de la costa durante la tarde (Kaplan *et al.* 2003). También hay una fuerte fluctuación semi-diurna de la temperatura en capas más profundas que corresponde a la componente M2 de marea (periodo de 12.42 h), que es dominante en la zona (Kaplan *et al.* 2003).



**Figura 1:** Ubicación del área de estudio en la costa de Chile central (panel izquierdo), y posición de los 3 sitios donde se registró la variabilidad de temperatura superficial y del asentamiento de cirripedios (panel derecho). Los círculos rojos representan los lugares donde fueron instalados los anclajes de temperatura y el triángulo azul donde fue instalado el ADCP. En el panel derecho también se muestra los ejes de coordenadas que se utilizaron para rotar las corrientes y el viento en el capítulo 1 (azul) y el viento en el capítulo 2 (verde). También se muestran los contornos de la batimetría de la región (panel izquierdo) y la bahía (panel derecho).

### 3.2. Observaciones

#### - Viento

Los datos de velocidad y dirección del viento para el periodo de Octubre 2006 a Diciembre 2008 se obtuvieron de la estación meteorológica del Faro Panul ( $33^{\circ}34.898'S$ ,  $71^{\circ}37.160'O$ ), ubicada a 10 km al sur de la punta norte de la bahía, aproximadamente a 30 metros sobre el nivel medio del mar (msnm). Para Diciembre 2011, las mediciones de viento se obtuvieron desde la estación meteorológica de la Estación Costera de Investigaciones Marinas de la P. Universidad Católica de Chile ( $33^{\circ}30.121'S$ ,  $71^{\circ}38.014'O$ ) ubicada en la punta norte de la bahía a 30 msnm (Figura 1 y Tabla 1).

#### - Temperatura del agua

Se trabajó con series de tiempo de temperatura registrada cada 5 min desde Octubre 2006 a Diciembre 2008, y de Noviembre 2011 a Marzo 2012. Los datos de temperatura se obtuvieron mediante registradores TidBit (Onset Computer Corp., USA) instalados en el submareal somero en 3 sitios dentro de la bahía: ECIM, Playa Chica y Cartagena (Figura 1). También se registró la temperatura de la columna de agua mediante instrumentos similares ubicados a distintas profundidades en dos líneas ancladas en aproximadamente 20 metros frente a los sitios ECIM y CTGN. Estas mediciones simultáneas en ambos extremos de la bahía abarcaron el periodo comprendido entre el 3 de Diciembre y 26 de Diciembre de 2011 (Figura 1 y Tabla 1).

#### - Corrientes y nivel del mar

Los datos de velocidad de corrientes se obtuvieron entre noviembre y diciembre de 2008 por medio de un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), modelo Workhorse de 600 kHz (Teledyne Instruments, San Diego, California) instalado sobre el fondo a una profundidad cercana a los 20 metros, a aproximadamente 200 m de la costa en el extremo norte de la bahía ( $33^{\circ}30.351'S$ ,  $71^{\circ}35.950'O$ ), y midiendo con una resolución vertical (bin size) de 1 metro a

intervalos de 1 minuto (Figura 1 y Tabla 1). Desde el ADCP se obtuvo además un registro de temperatura de fondo y nivel del mar (presión).

- Asentamiento de cirripedios

Se trabajó con series de tiempo de asentamiento de cirripedios obtenidas diariamente durante los periodos de primavera-verano (octubre a diciembre) de los años 2006, 2007 y 2008. Las observaciones se llevaron a cabo en tres localidades (Figura 1) utilizando placas de acrílico revestidas con material antideslizante (SafetyWalk, 3M) e instaladas en cuadruplicado en la zona intermareal baja de cada localidad mediante tornillos de acero inoxidable. Este tipo de colector ha sido ampliamente utilizado durante las últimas décadas, por lo tanto es un tipo de medición comparable con aquellas obtenidas en otras regiones como California (Farrell *et al.* 1991), Oregon (Shanks 2009, Barshis *et al.* 2011), Portugal (Jacinto & Cruz 2008) y Sudáfrica (Hoffman *et al.* 2012). Las placas fueron recuperadas y reemplazadas durante marea baja, almacenadas por separado en bolsas selladas, y llevadas al laboratorio de la Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM) donde se identificaron y contaron las especies *Jehlius cirratus*, *Notochthamalus scabrosus* y *Notobalanus flosculus*. Estas especies se encuentran entre las más abundantes del intermareal rocoso de la costa de Chile central (Navarrete & Castilla, 1990). Los chthamalidos *J. cirratus* y *N. scabrosus* ocupan la zona media y alta del intermareal, mientras que el balánido *N. flosculus* es más abundante en la zona baja. Se ha demostrado mediante estudios de laboratorio que la fase planctónica de ambos chthamalidos dura entre 22 y 29 días a 18-20°C, y entre 39 y 41 días a 15-18°C (Venegas *et al.* 2000). A pesar de que no hay estudios que establezcan la duración de la fase larval en *N. flosculus*, trabajos no publicados indican que el desarrollo planctónico en esta especie puede durar 39 días a temperaturas entre 18 y 20 °C. Al completar su desarrollo en el plancton, las larvas de cirripedios alcanzan un estadio “competente” conocido como *cypris*, el cual se asienta en el intermareal y sufre un proceso de metamorfosis para entrar a un estadio bentónico temprano conocido como *spat* dentro de las 24 horas siguientes (e.g. Tapia & Navarrete 2010).

**Tabla 1:** Variables físicas y biológicas y periodos utilizados para el análisis de los datos.

<b>Capítulo 1</b>	<b>Periodos utilizados para el análisis de los datos</b>
Viento	Nov - Dic 2008*, Dic 2011**
Temperatura del submareal somero	Oct 2006 - Mar 2007*, Oct 2007 - Mar 2008*, Oct 2008 - Mar 2009*, Nov 2011 - Mar 2012**
Temperatura de la columna de agua	Dic 2011**
Corrientes	Nov - Dic 2008*
Nivel del mar	Nov - Dic 2008*
<hr/>	
<b>Capítulo 2</b>	
Viento	Oct 2006 - Feb 2007*, Oct 2007 - Feb 2008*, Oct 2008 - Dic 2008*
Temperatura del submareal somero	Oct 2006 - Feb 2007*, Oct 2007 - Feb 2008*, Oct 2008 - Dic 2008*
Asentamiento larval	Oct - Dic 2006*, Oct - Dic 2007*, Oct - Dic 2008*

Se indica el origen de los datos utilizados:

\*Proyecto FONDECYT 3070014

\*\* Este estudio

### 3.3. *Procesamiento y análisis de la información*

#### - Capítulo uno

Aunque las mediciones de viento y corrientes se registraron a intervalos de 10 minutos y 1 minuto respectivamente, se trabajó con series horarias promediando las componentes cartesianas norte-sur y este-oeste. Para obtener el ángulo del eje de máxima variabilidad de las corrientes primero se promediaron todas las observaciones de cada bin para cada componente ortogonal norte-sur y este-oeste. A partir de estas series promediadas se determinó el eje de máxima variabilidad desde la matriz de covarianza correspondiente. El ángulo del eje principal en cada caso correspondió a la dirección del vector propio asociado al valor propio principal de la matriz de covarianza. Este ángulo se utilizó para rotar el sistema de coordenadas tanto del viento como de las corrientes, y obtener así las componentes ortogonales en relación a la orientación de la costa a escala local (Figura 1, ejes azules). De acuerdo a la rotación realizada, la componente a lo largo de la costa (y) es positiva (negativa)

cuando el viento y corrientes se dirigen al noroeste (sureste), mientras que la componente perpendicular a la costa ( $x$ ) es positiva (negativa) cuando se dirigen al noreste (suroeste) (Figura 1).

Se realizaron análisis espectrales de las series de viento y temperatura del agua previa remoción de tendencia lineal. Asimismo se realizaron análisis de coherencia y de fase entre series horarias de temperatura registradas en los anclajes de cada localidad y profundidad, y el viento medido en la estación ECIM utilizando el método de Welch (Emery & Thomson 2001) (Tabla 1). Para caracterizar la variabilidad temporal y estructura vertical asociada en las corrientes medidas, se realizó un análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) para cada componente ortogonal de las corrientes de manera independiente. El EOF tiene la ventaja de proporcionar una descripción más general de la variabilidad espacial y temporal de las series de tiempo en términos de funciones ortogonales o “modos” estadísticos (Emery & Thomson 2001).

El registro de nivel del mar obtenido en 2008 (Tabla 1) se utilizó para predecir el nivel del mar en diciembre del 2011, mediante la función `t_predic` del paquete de herramientas `t_tide` implementado en MATLAB por Pawłowicz *et al.* (2002). Con el fin de enfocarnos en la variabilidad diurna y semi-diurna de la temperatura, se procesaron los datos con un filtro pasa banda coseno Lanczos diseñado para aislar la variabilidad en la banda de frecuencia entre 0.86 y 4 cpd (periodos de 6 a 28 horas). Para evaluar la asociación entre las fluctuaciones de temperatura en la columna de agua y la marea semi-diurna, para ambos extremos de la bahía se calculó un día lunar promedio con las temperaturas pre-filtradas y el nivel del mar. Se define aquí el día lunar promedio como un ciclo de 24.84 h, correspondiente al tiempo que toma a la luna dar una vuelta completa alrededor de la Tierra, con el tiempo cero correspondiente a la primera pleamar del primer día de la serie de tiempo. A diferencia del día solar promedio de 24 h, que puede reflejar procesos diurnos que afectan la temperatura como el calentamiento solar y la brisa marina, el día lunar promedio de 24.84 h permite visualizar fluctuaciones relacionadas con la marea semi-diurna, que tiene un periodo de 12.42 horas.

Finalmente, para evaluar el efecto del viento sobre los ciclos diurnos de las corrientes en la plataforma interior se calcularon días solares promedio para las componentes de velocidad perpendicular y paralela a la costa, separando días con viento fuerte y débil. Para este cálculo se utilizaron series de velocidades filtradas con un filtro pasa banda coseno Lanczos diseñado para aislar periodos de 20 a 28 horas. La clasificación de días con viento fuerte y viento débil se basó en la distribución de frecuencias de una serie de tiempo de máximos diarios de la magnitud del viento para los días considerados en esta sección (Tabla 1). Los días con viento fuerte correspondieron a aquellos en que la máxima velocidad estuvo por sobre el percentil 75 de la distribución, y los días con viento débil correspondieron a aquellos con velocidad máxima por debajo del percentil 25 de la misma distribución.

## - Capítulo 2

A diferencia de la sección anterior, en este análisis no se consideró la variabilidad en las corrientes, y se rotó el sistema de coordenadas a partir del ángulo del eje principal del viento (Figura 1, ejes verdes). Dicho ángulo se calculó utilizando el mismo método descrito en la sección anterior. En este caso el componente a lo largo de la costa es positivo (negativo) cuando el viento sopla hacia el noreste (suroeste), y el componente perpendicular a la costa es positivo (negativo) cuando el viento se dirige hacia el sureste (noroeste). El stress o esfuerzo del viento fue calculado a partir de las series de magnitud o módulo del viento según Large & Pond (1981).

Para evaluar la relación entre la intensidad del viento y los ciclos diurnos de la temperatura superficial en distintos puntos de la bahía, los días para los que se dispuso de información para ambas variables (Tabla 1) fueron clasificados en días con viento fuerte, moderado y débil, siguiendo un criterio similar al detallado en la sección anterior, basado en la distribución de frecuencias del máximo de viento en cada día. A diferencia de dicha sección la clasificación se basó en el máximo stress de viento de la componente principal registrada para cada día. Los días con viento fuerte correspondieron a aquellos con máximo stress de viento por sobre el percentil 75, los días con viento moderado correspondieron a aquellos con máximo stress entre los percentiles 25 y 75, y los días con viento débil fueron aquellos en que el stress máximo

estuvo por debajo del percentil 25. Para cada escenario de viento se calculó el día solar promedio (ciclo de 24 h) de la temperatura en cada una de las tres localidades para las que se dispuso de registros continuos de temperatura (Figura 1 y Tabla 1).

Las series de tiempo de tasas horarias de asentamiento de cirripedios (Tabla 1) se calcularon para cada especie y localidad promediando los conteos totales de individuos (i.e. suma de los conteos de cypris y spat) encontrados en las placas, y dividiendo estos promedios por el número de horas que las placas permanecieron instaladas en el intermareal. Para cada uno de los escenarios de viento recién detallados se realizaron análisis de correlación (Kendall) entre las tasas de asentamiento registradas en las tres localidades. Este tipo de correlación es un test estadístico no paramétrico que se usa para medir la asociación entre dos variables (Zar 1999). Finalmente, para cada especie y día en que se registró asentamiento se calculó el coeficiente de variación espacial (CVE) es decir el coeficiente de variación entre las tasas de asentamiento registradas en las tres localidades, como un *proxy* de la heterogeneidad espacial del asentamiento de cirripedios en la bahía. A mayor (menor) CVE, mayor (menor) heterogeneidad espacial del asentamiento en la bahía. Para evaluar la relación entre el CVE en el asentamiento y las fluctuaciones interdiarias en el viento, se generaron series de tiempo diarias del máximo stress de viento y del stress de viento integrado durante el día. Posteriormente, para cada serie de viento y CVE se calculó el coeficiente de correlación de Spearman y su correspondiente significancia estadística. En estos análisis sólo se utilizaron días en los que hubo al menos 12 larvas de una determinada especie asentadas en la bahía. Debido a que en total había 12 colectores desplegados en la bahía (4 réplicas por localidad), se asumió que en un escenario de máxima homogeneidad espacial en el asentamiento debiese haber mínimo 12 larvas asentadas, es decir una por colector.

## 4.- RESULTADOS

### 4.1. Diferencias espaciales en la estructura térmica dentro de una bahía: el efecto del viento diurno y la marea semi-diurna.

*Continental Shelf Research*, 88: 72 – 80, 2014.

#### Resumen

En este estudio se caracterizó la variabilidad diurna y semi-diurna de la estructura hidrográfica y circulación de la plataforma interior en la bahía de Cartagena, ubicada a sotavento del centro de surgencia Punta Toro en la costa de Chile central, y se evaluó el rol relativo del viento diurno y la marea semi-diurna como forzantes físicos de dicha variabilidad durante la primavera-verano. Los resultados revelan que la importancia relativa de estos forzantes y la estructura térmica varían en escalas espaciales pequeñas dentro de la bahía. La columna de agua en el extremo sur de la bahía (CTGN), y más protegido del viento, mostró una fuerte estratificación durante todo el día, a pesar de la intensa brisa marina. La variabilidad de la temperatura en CTGN tuvo una fuerte relación con la marea semi-diurna en toda la columna de agua. En el sitio del norte (ECIM), y más expuesto al viento, las fluctuaciones de la temperatura superficial fueron principalmente diurnas y estuvieron fuertemente asociadas con el viento diurno. El efecto del viento se debilitó cerca del fondo, donde la temperatura mostró una mayor relación con la marea semi-diurna. En ECIM la estructura vertical de la corriente perpendicular a la costa, durante condiciones de viento fuerte, presentó una estructura de doble capa, siguiendo la misma dirección del viento en la superficie y la dirección opuesta en el fondo. La variabilidad diurna de la corriente perpendicular a la costa reveló una fuerte relación con el viento diurno, lo cual sugiere que este flujo podría estar forzado directamente por el viento. Es posible que la circulación diurna y la variabilidad espacial de la temperatura dentro de la bahía sean importantes para la dispersión de larvas y para el transporte de material hacia la costa.



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Continental Shelf Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/csr](http://www.elsevier.com/locate/csr)

## Research papers

## Spatial differences in thermal structure and variability within a small bay: Interplay of diurnal winds and tides

Jessica Bonicelli<sup>a,c,\*</sup>, Carlos Moffat<sup>b,c</sup>, Sergio A. Navarrete<sup>d</sup>, John L. Largier<sup>e</sup>, Fabian J. Tapia<sup>b,c</sup><sup>a</sup> Programa de Postgrado en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile<sup>b</sup> Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción 4030000, Chile<sup>c</sup> Programa COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción, Concepción, Chile<sup>d</sup> Estación Costera de Investigaciones Marinas, Las Cruces and Center for Marine Conservation, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile<sup>e</sup> Bodega Marine Laboratory, University of California Davis, CA, USA

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 23 September 2013

Received in revised form

15 July 2014

Accepted 18 July 2014

Available online 26 July 2014

## Keywords:

Water temperature

Diurnal wind

Sea breeze

Tidal variability

Diurnal circulation

## ABSTRACT

We characterize diurnal and semidiurnal temporal variability of the spring and summer near-shore hydrographic structure and circulation in Cartagena Bay, a small open bay in central Chile, and assess the relative role of diurnal wind and semidiurnal tide as forcing mechanisms of that variability. Our results highlight that the relative importance of these forcing mechanisms and the thermal structure can vary over small spatial scales within the bay. The water column at the southern and most wind-sheltered study site within the Bay (CTGN) was stratified all day despite the sea breeze. Throughout the water column, temperature variability at CTGN was strongly associated with the semidiurnal tide. At the northern site (ECIM), which was relatively more exposed to wind forcing, surface layer temperature fluctuations were principally diurnal and tightly associated with diurnal wind variability. The wind effect weakened near the bottom, where temperature variability was also correlated with the semidiurnal tide. At ECIM, we observed a vertically sheared cross-shore current structure, with onshore surface flow and offshore flow at mid-depth during strong winds. The diurnal variability in cross-shore flows matched diurnal variability in winds, suggesting that this vertical circulation could be directly forced by the wind. The diurnal circulation and the spatial differences in thermal structure across the bay are likely to be important for larval dispersal and material transport in and out of the Bay, as well as between near-shore waters and the shoreline.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Over the past two decades several field and modeling studies have shown that the circulation over the inner-shelf, i.e. the coastal region where upper and lower boundary layers overlap (Lentz, 1995), can be strongly influenced by tides, surface waves and diurnal winds (Dellatorre et al., 2012; Lentz and Fewings, 2012; Sobarzo et al., 2010). The relative importance of these phenomena varies temporally and spatially due to variability in larger scale climatic and oceanic forcing in combination with the local topography. These interactions produce characteristic patterns of variability in hydrographic conditions that strongly affect the cross-shelf advection of water properties and suspended particles, including the planktonic larvae of many benthic species

(Pineda, 2000). Thus, the inner-shelf constitutes a pathway for the planktonic larvae of many ecologically and commercially important species (e.g. Morgan et al., 2009, 2012; Pineda et al., 2010). Understanding the interplay of physical processes that jointly drive physical and biological variability in these environments is thus essential to explain the ecological structure and dynamics in the coastal ocean.

A number of studies aimed at bridging this knowledge gap have been conducted in Cartagena Bay, central Chile, where physical variability over a range of temporal scales has been characterized via in situ measurements as well as satellite-derived data (Kaplan et al., 2003; Narváez et al., 2004; Piñones et al., 2005; Vargas et al., 2006). The circulation and hydrographic structure of continental shelf waters in central Chile is dominated by coastal upwelling (Strub et al., 1998), which is driven by strong southerly winds that intensify during spring and summer months. Numerous capes and bays in this region introduce spatial complexity in this wind-driven shelf circulation (Figueroa and Moffat, 2000; Valle-

\* Corresponding author at: Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción 4030000, Chile. Tel.: +56 962139631.  
E-mail address: [jbonicelli@udec.cl](mailto:jbonicelli@udec.cl) (J. Bonicelli).

Levinson et al., 2003), as well as in local regimes of environmental variability (Tapia et al., 2009). Although Cartagena Bay is located 20 km north of a strong upwelling center at Punta Toro (Wieters et al., 2003), the temperature signal resulting from wind-driven upwelling inside this bay is weak (Narváez et al., 2004; Tapia et al., 2009). During winter there is a cold and well mixed water column, while during spring–summer months the water temperature increases and there is a well defined thermocline at about 10 m depth (Narváez et al., 2004). An observational study near the northern tip of the bay has shown strong diurnal fluctuations in temperature that span most of the water column (Kaplan et al., 2003). These fluctuations have been attributed to the combined effect of diurnal heating and a strong sea breeze, which promotes the onshore transport and near-shore retention of warm water during the afternoon (Kaplan et al., 2003). There is also a strong semidiurnal temperature fluctuation in near-bottom layers that corresponds to the M2 tidal constituent, which is dominant in the area (Kaplan et al., 2003). However, little is known about the patterns of circulation in the Bay and hydrographic variability in response to diurnal wind and tidal forcing as well as the role that coastal topography may play in modulating local winds and currents in the bay.

Here, we use time-series data collected simultaneously across Cartagena Bay to characterize high frequency variability in temperature, hydrographic structure and near-shore currents, and to assess the relative role of diurnal wind and semidiurnal tides as drivers of inner-shelf circulation. We focus on diurnal and semidiurnal variability in temperature in the Bay, which results from transport patterns that are also expected to be important for the advection of planktonic organisms and water pollution to and from near-shore areas (e.g. Kaplan et al., 2003; Vargas et al., 2004; Woodson et al., 2007).

## 2. Materials and methods

### 2.1. Study area

Cartagena Bay (Fig. 1) is a 6-km-wide bay in central Chile ( $33^{\circ}31.2'S$ ,  $71^{\circ}37.1'W$ ), where the continental shelf is narrow (10–20 km). Although flanked by headlands where coastal upwelling is particularly strong, Punta Curaumilla to the north and Punta Toro to the south (Wieters et al., 2003), upwelling-driven thermal variability within the bay is weak (Tapia et al., 2009). The interaction of meso-scale atmospheric and oceanographic conditions with local topography appears to promote the retention of warm water downstream of Punta Toro and inside the bay (Kaplan et al., 2003; Narváez et al., 2004), a phenomenon that has been termed “upwelling shadow” (Graham and Largier, 1997). There is a strong sea breeze during summer, when the land–ocean thermal gradient is strongest (Kaplan et al., 2003; Narváez et al., 2004). Among the tidal constituents the most important is the M2 with a period of 12.42 h (Kaplan et al., 2003). Although diurnal constituents are not negligible, their fluctuations are relatively weak in this area (Kaplan et al., 2003).

### 2.2. Data sources

Water temperature records were obtained from three shoreline sites within the bay (Fig. 1). Stowaway TidBit loggers (Onset Computer Corp., USA), recording at 5 min intervals were deployed 1 m below Mean Lower Low Water (MLLW) from October 2006 until March 2009 and from November 2011 until March 2012 (Table 1). Two sites were located near the northern end (ECIM, PCHC), and one (CTGN) was located near the southern end (Fig. 1).

Concurrent observations of water column temperatures were obtained in December 2011 from moored thermistor strings deployed on the 20 m isobath near ECIM and CTGN (Fig. 1, Table 1).

Wind data for November–December 2008 were obtained from the Faro Panul meteorological station, located 3 km south of the southern end of the bay and at 30 m above sea level ( $33^{\circ}34.898'S$ ,  $71^{\circ}37.160'W$ ) (Fig. 1). For December 2011, we used data from the Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM), located on the northern tip of the bay ( $33^{\circ}30.121'S$ ,  $71^{\circ}38.014'W$ ), as no data were available from Faro Panul. ECIM is 10 km away from Faro Panul and also 30 m above sea level (Fig. 1).

Measurements of current velocities were collected using a bottom-mounted 600 kHz Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP, RDI, 600 kHz) deployed for 49 days near ECIM (Fig. 1) in November–December 2008 (Table 1). The ADCP was deployed at 20 m depth (20 m below MLLW) and recorded velocity data between 3 and 18 m above bottom (mab) as 1-min ensembles with a vertical resolution (bin size) of 1 m. A record of water level was obtained from the pressure sensor of the ADCP (Table 1). We used this water level dataset to predict tidal water level variability for December 2011 using the T\_TIDE toolbox (Pawlowicz et al., 2002).

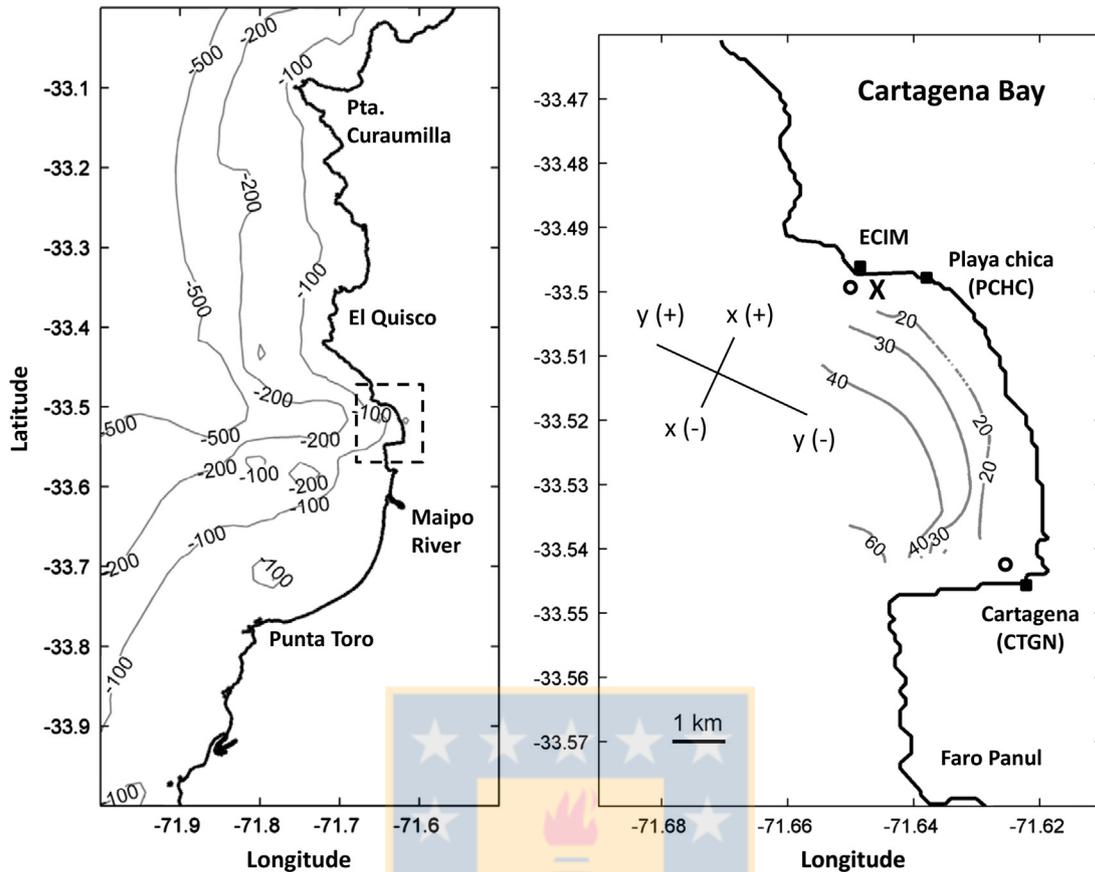
### 2.3. Data processing and analysis

Wind and current velocity data were rotated into a common coordinate system using the angle of the principal axis of currents ( $295.7^{\circ}$  relative to north), which is roughly aligned with the direction of the coast at ECIM (Fig. 1). In this rotated coordinate system, the along-shore component ( $y$ ) is positive towards the northwest (i.e. out of the bay) and the cross-shore component ( $x$ ) is positive towards the northeast (i.e. onshore). Empirical orthogonal functions were calculated independently for along-shore and cross-shore current components.

To explore the daily cycle in water temperature, 24-h canonical day patterns were calculated. To examine high-frequency temperature variability more generally, including diurnal and semidiurnal variability, we used a band-pass Lanczos cosine filter to isolate the frequency band between 0.86 and 4 cpd (i.e. periods of 6–28 h). Also, we calculated frequency-dependent coherence and phase between wind and temperature variability.

To assess the association between temperatures and semidiurnal tides we used the band-pass filtered data to calculate the mean lunar day (or canonical lunar day) at each study site (ECIM and CTGN), i.e. a typical temperature cycle of 24.84 h, with time zero being the first high tide of the first day in the time series. We used the lunar-day period to produce a canonical cycle related to the semidiurnal tide, in contrast to the canonical day related to diurnal processes such as solar warming and diurnal winds.

We also calculated canonical days independently for along-shore current speed, cross-shore current speed, and wind speed. This was done separately for ‘strong wind’ days and ‘weak wind’ days, where strong wind days had daily maxima above the 75th percentile ( $> 7 \text{ m s}^{-1}$ ) and weak wind days had daily maxima below the 25th percentile ( $< 4.6 \text{ m s}^{-1}$ ). Canonical-day patterns were calculated from band-pass filtered wind and current velocities (periods of 20–28 h) plus the mean. Finally, depth-specific cross-correlations were computed between band-pass filtered cross-shore currents and cross-shore winds. The first-differenced time series were used to remove autocorrelation prior to cross-correlation analyses (Pineda and López, 2002). Here we use ‘sea breeze’ and ‘land breeze’ *sensu lato* to indicate onshore and offshore winds with diurnal periodicity, respectively.



**Fig. 1.** Location of Cartagena Bay on the coast of central Chile (segmented square in left panel), showing also the bathymetry and the sites where water temperature, wind velocity and currents were recorded (right panel). The right panel shows the coordinate system adopted to rotate current and wind velocity vectors (black axes). The X near site ECIM indicates the position of an ADCP deployed during November–December 2008, whereas the circles mark the location of thermistor lines deployed off ECIM and CTGN during December 2011.

**Table 1**  
Metadata for measurements of temperature, wind, water level and currents.

Variable	Type of measurement	Sampling depth/altitude	Sampling interval (min)	Sites	Dates spanned
Temperature	Surface	1 m below MLLW	5	ECIM, PCHC, CTGN	Oct 2006–Mar 2007, Oct 2007–Mar 2008, Oct 2008–Mar 2009, Nov 2011–Mar 2012.
	Water-column	19 (ECIM) and 17 (CTGN) m above bottom	5	ECIM, CTGN	Dec 2011
Wind	Coastal	30 m above sea level	10	Faro Panul	Nov–Dec 2008.
	Coastal	30 m above sea level	10	ECIM	Dec 2011
Sea level	Shallow subtidal	1 m below MLLW		ECIM	Nov–Dec 2008
Currents	Inner-shelf	20 m above bottom	1	ECIM	Nov–Dec 2008

### 3. Results

#### 3.1. Temperature, wind and sea level variability

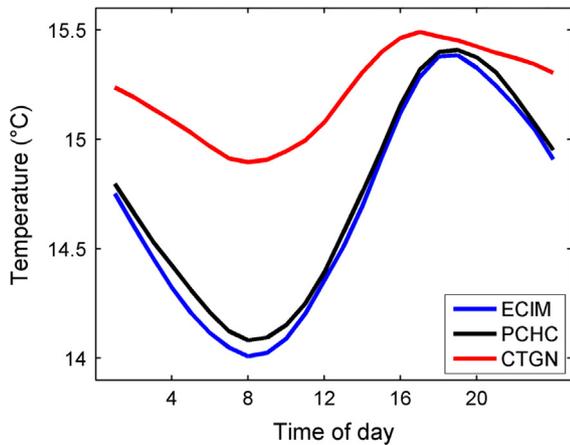
The canonical day produced by averaging data from all four spring–summer seasons showed diurnal patterns in shallow temperatures at the shoreline that were distinct across the bay and very similar at the two northern sites (Fig. 2). The diurnal cycle at CTGN had a smaller amplitude and an earlier diurnal maximum (Fig. 2). At both ends of the bay temperature decreased at night and reached minimum values (ECIM=14 °C; PCHC=14.1 °C; CTGN=14.9 °C) soon after sunrise (8 AM), and then increased during the afternoon to reach maximum values just before sunset (6 PM) at ECIM (15.4 °C) and PCHC (15.4 °C), and earlier (4 PM) at CTGN (15.5 °C) (Fig. 2).

In December 2011, cross-shore wind at ECIM was stronger than along-shore wind (Fig. 3A), and spectra showed that the diurnal cycle explained a substantial fraction of wind variability in the cross-shore (35% of total variance) and along-shore (29% of total variance) components (Fig. 3B). Temperature time series from moorings in the same period revealed contrasting conditions between the two near-shore sites (Figs. 3C,E). Diurnal variability at ECIM is notable both near-surface and near-bottom (Fig. 3C), but at CTGN diurnal variability was weak near-surface (Fig. 3E). A greater temperature difference between surface and bottom was observed at CTGN during the entire month, indicating strong and persistent stratification (Fig. 3E), even on days with strong winds ( $> 10 \text{ m s}^{-1}$ ), such as 21–22 December (Fig. 3A) – indeed stratification grew through the upwelling event, with the surface warming as colder bottom waters intruded into the bay.

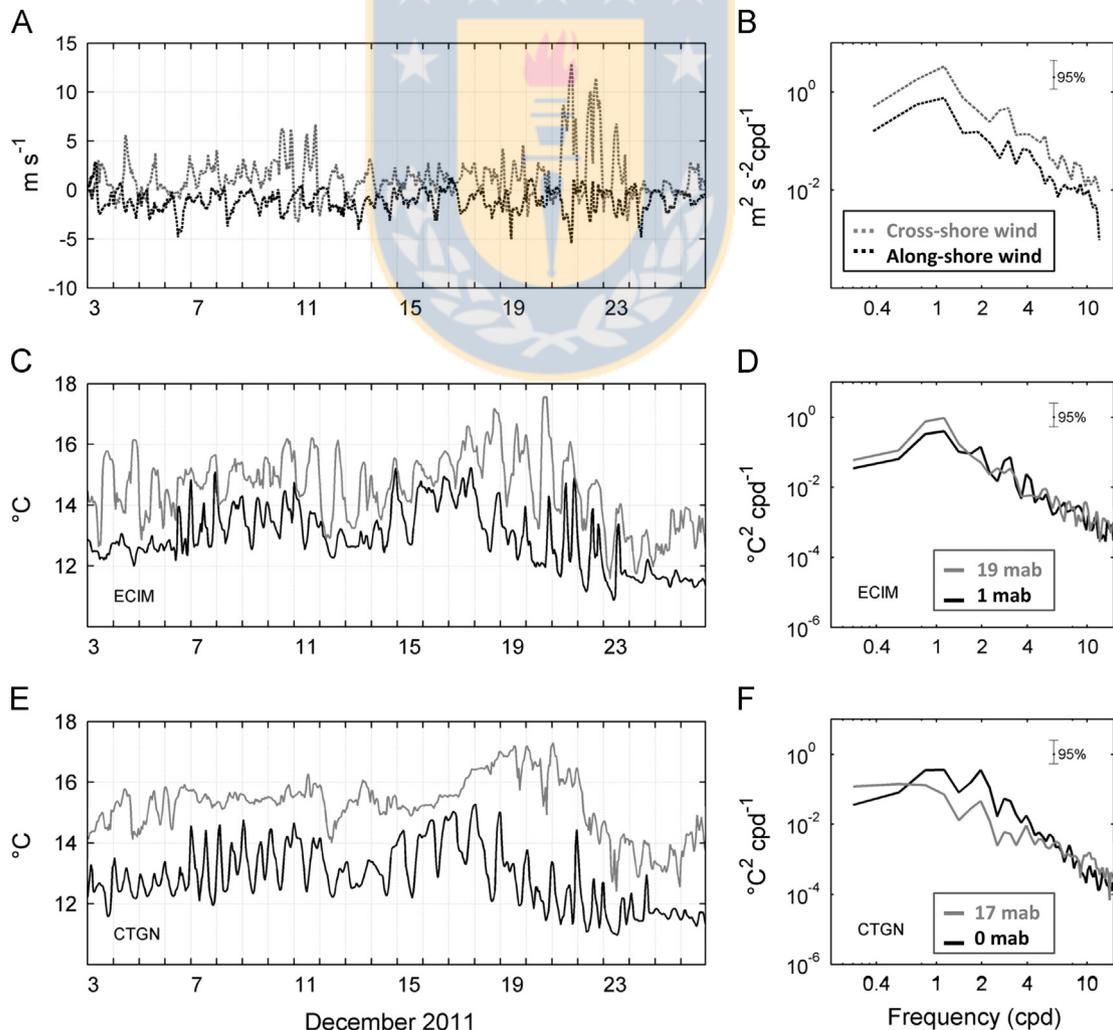
Temperature spectra showed a strong diurnal peak at ECIM both near-surface (38% of total variance) and near-bottom (27% of total variance) and a semidiurnal peak that was more important near-bottom (9% of total variance) than near surface (2% of total

variance) (Fig. 3D). Spectra computed for CTGN showed a marked semidiurnal peak (20% of total variance), as strong as the diurnal signal (20% of total variance) near-bottom, and that near-bottom temperature variability is stronger than near-surface variability over a broad diurnal/semidiurnal spectral band (Fig. 3F).

We further evaluated the patterns of daily variation in December 2011 through canonical-day analysis. Winds at ECIM showed large changes in direction and speed during the day (Fig. 4A,B), being typically weak at night ( $< 1 \text{ m s}^{-1}$ ), with a minimum around 8 AM, and reaching maximum values  $> 3 \text{ m s}^{-1}$  between noon and 4 PM (Fig. 4A). The dominant wind direction during the day (9 AM–8 PM) was from the southwest, but as the wind weakened the direction varied from westerly to northerly (Fig. 4B). The daily pattern of temperature at ECIM mooring showed a greater range near-surface (1.4 °C) than near-bottom (0.8 °C); this clear diurnal signal is represented by deepening of isotherms during the daily onshore winds, between 10 AM and 10 PM (Fig. 4C). Near-bottom temperatures varied similarly, with isotherms shoaling during weak winds between 10 PM and 10 AM; a secondary weak shoaling of isotherms is also observed in the afternoon (3 PM–5 PM). At CTGN, thermal stratification persisted throughout the day irrespective of wind (Fig. 4A,D), with a surface layer of warm water remaining at around 15 °C throughout the day (Fig. 4D). Even during the early morning hours, when the surface temperature at ECIM dropped below 14 °C, surface temperature at CTGN remained above 15 °C. Near-surface isotherms at CTGN deepened slightly during the afternoon, and more noticeably between



**Fig. 2.** Canonical day computed from the time series of shoreline temperatures recorded during four consecutive spring–summer seasons at the northern (ECIM: blue; PCHC: black) and southern (CTGN: red) sites in Cartagena Bay. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)



**Fig. 3.** Cross-shore (dotted gray line) and along-shore (dotted black line) wind (A) and water temperature recorded at the surface (gray solid line), and bottom (black solid line) layers at ECIM (C) and CTGN (E) mooring sites. Also shown are the power spectra for wind (B) and temperature at ECIM (D) and CTGN (F).

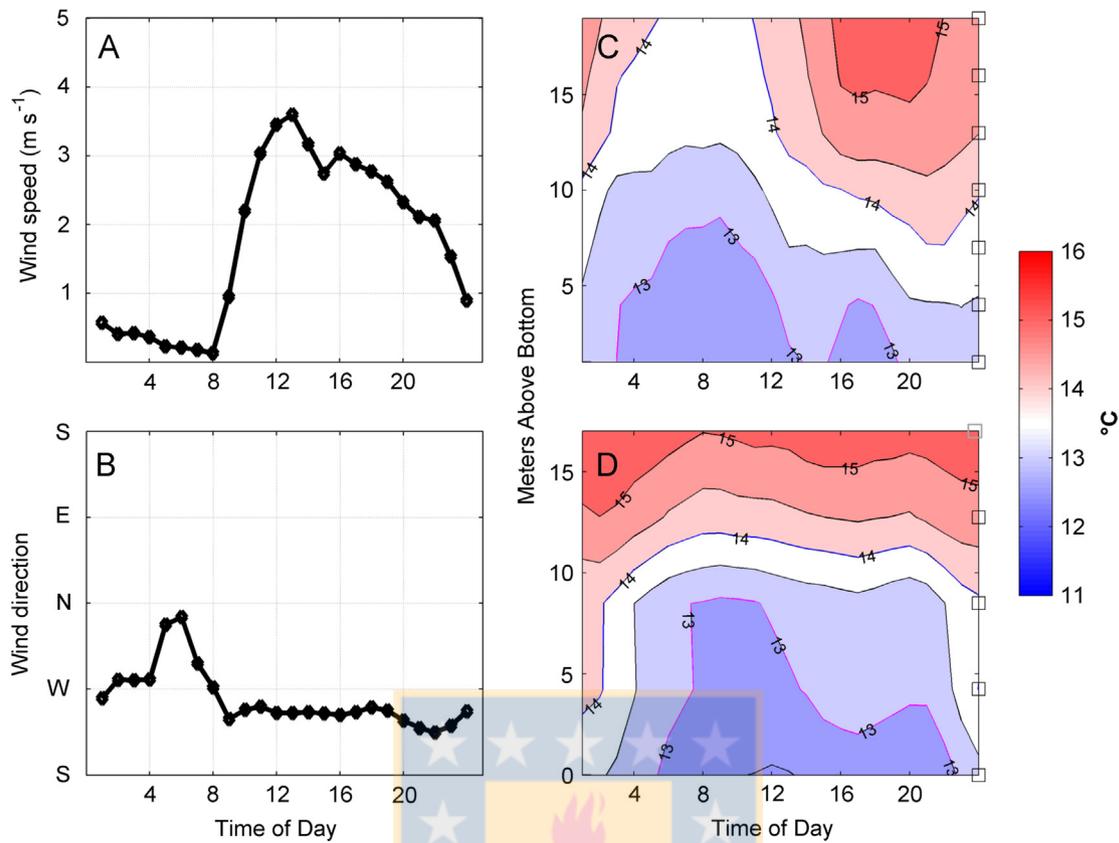


Fig. 4. Canonical days of wind speed (A), wind direction (B) and water temperature at (C) ECIM and (D) CTGN. Square symbols on the right axes of C and D represent the vertical position of temperature loggers.

8 PM and 1 AM (Fig. 4D), which is when surface isotherms at ECIM were shoaling (Fig. 4C). Near-bottom, there was a morning shoaling of isotherms at both sites, although at CTGN it was delayed by ca. 2 h relative to that observed at ECIM (see 13 °C isotherm on Fig. 4C,D).

In addition to the 24 h diurnal cycle, we evaluated tidal variability through a canonical-lunar-day analysis (Fig. 5). Temperature fluctuations showed a clear association with the semi-diurnal tide (Fig. 5A), with warmest waters just before low tide and coldest waters just before high tide (Fig. 5B,C). At ECIM, the coupling of temperature fluctuation with semidiurnal tides was most evident in the bottom half of the water column (Fig. 5B), but occurred throughout the water column at CTGN (Fig. 5C). While near-surface temperatures at ECIM showed weak links to tidal variability (Fig. 5A), they were coherent with cross-shore wind at diurnal time scales (Table 2). Phase relationships showed that warm waters occur daily through most of the water column, following onshore winds with a lag of ca. 3 h. In contrast, temperature at CTGN showed significant coherence with diurnal winds only at mid depth, and with a lag of about 7 h (Table 2).

### 3.2. Current variability

The first EOF mode (EOF1) calculated for both velocity components from ADCP currents near ECIM revealed a surface-intensified structure that explained 79% and 43% of variance in along-shore and cross-shore currents, respectively. For along-shore currents, amplitudes were positive throughout the water column (Fig. 6A) and spectral analysis showed that both diurnal and semidiurnal signals are significant (Fig. 6B). For cross-shore currents, the vertical structure of EOF1 exhibited a zero crossing at about 8 m above bottom, representing a two-layer flow structure (Fig. 6C). This cross-shore mode showed a significant peak only at diurnal

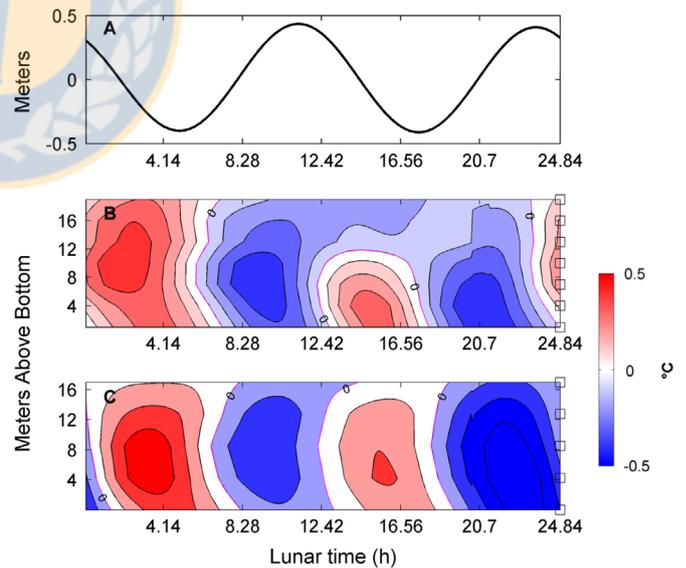


Fig. 5. Mean lunar day (period of 24.84 h) computed from predicted water level (A), band-pass-filtered (6–28 h) time series water column temperature at ECIM (B) and water column temperature at CTGN (C). Square symbols on the right axes of B and C represent the vertical position of temperature loggers.

period (Fig. 6D), indicating that this sheared cross-shore flow structure at ECIM is diurnally forced.

The canonical-day analysis of the diurnal currents showed clear differences between weak wind and strong wind days (Fig. 7). On weak wind days, along-shore currents were towards the northwest

(out of the bay) during the morning, and switched suddenly to southeast (into the bay) for the afternoon and evening; currents were generally in phase across depth (Fig. 7C). On strong wind days, the 24 h cycle in along-shore currents was weaker and delayed several hours, i.e. the peak flow out of the bay occurred at 5 PM instead of 6 AM and peak inflow occurred around midnight. Further, the maximum was below the surface and there is a marked phase lag

across depth with surface currents lagging currents at depth by several hours (Fig. 7D). In contrast, the 24 h cycle in cross-shore currents showed vertical shear for both wind conditions, although it was substantially less energetic (Figs. 7E,F). On weak wind days there was an offshore flow in the upper half of the water column that matched the along-shore flow out of the bay in the morning, with near-zero flows at other times. In contrast, on strong wind days a marked onshore flow was observed within the uppermost 3 m between noon and 5 PM, accompanied by an offshore flow centered at ca. 6 m depth and delayed by about 1 h (Fig. 7F). The onshore surface flow peaked at 3 PM, concurrent with the daily harmonic peak in winds directed onshore and into the bay (Fig. 7B). Cross-correlation analyses between diurnal cross-shore currents and diurnal cross-shore wind showed significant positive values ranging from 0.1 to 0.6 in the uppermost 5 m, and significant negative values ranging from -0.2 to -0.4 deeper into the water column.

**Table 2**

Coherence and phase between the cross-shore component of wind velocities recorded at site ECIM and water column temperatures collected from thermistor lines deployed at both ends of Cartagena Bay, near ECIM and CTGN for diurnal variability in December 2011.

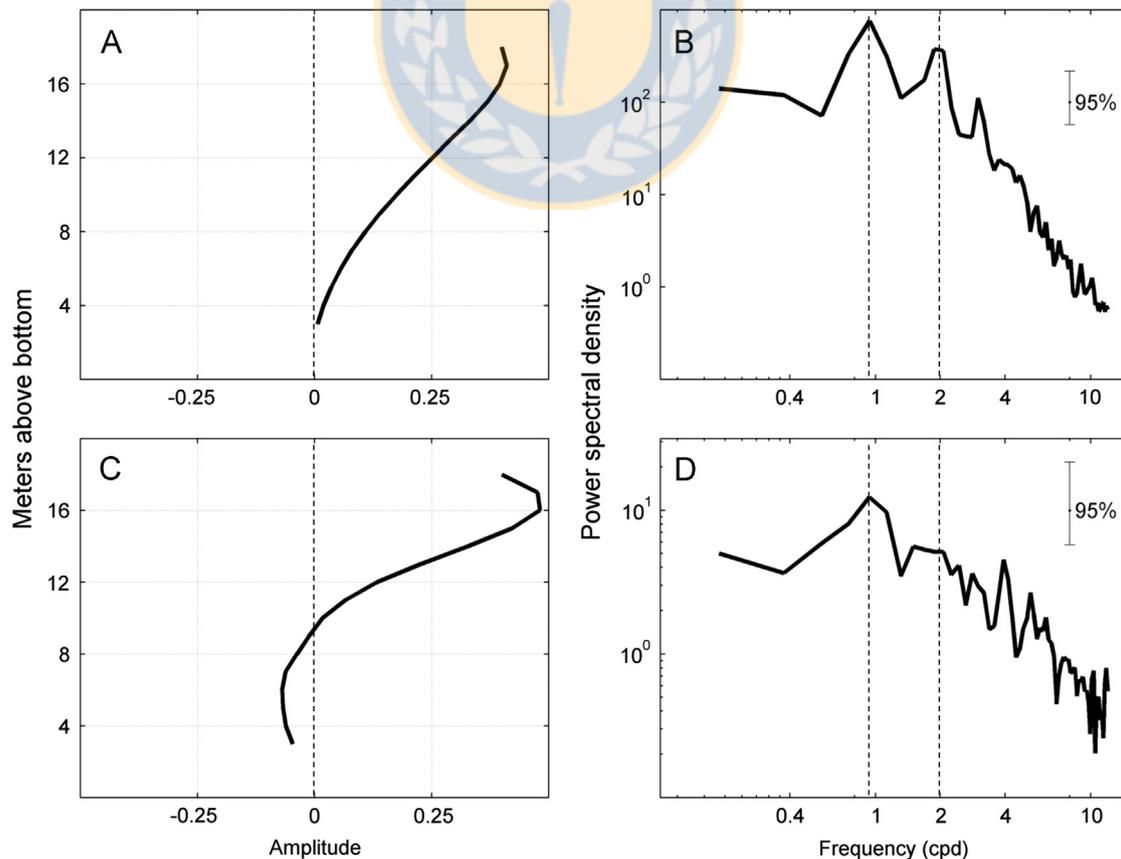
MAB	Coherence	Phase (°)	Phase (h)
ECIM			
19	0.61*	-53.43	3.5
16	0.64*	-51.12	3.4
13	0.63*	-52.5	3.5
10	0.55*	-50.01	3.3
7	0.44*	-45.53	3
4	0.33*	-48.14	3.2
1	0.27		
CTGN			
17	0.16		
13	0.28		
8	0.36*	-113.14	7.5
4	0.3		
0	0.22		

MAB: Meters Above Bottom.

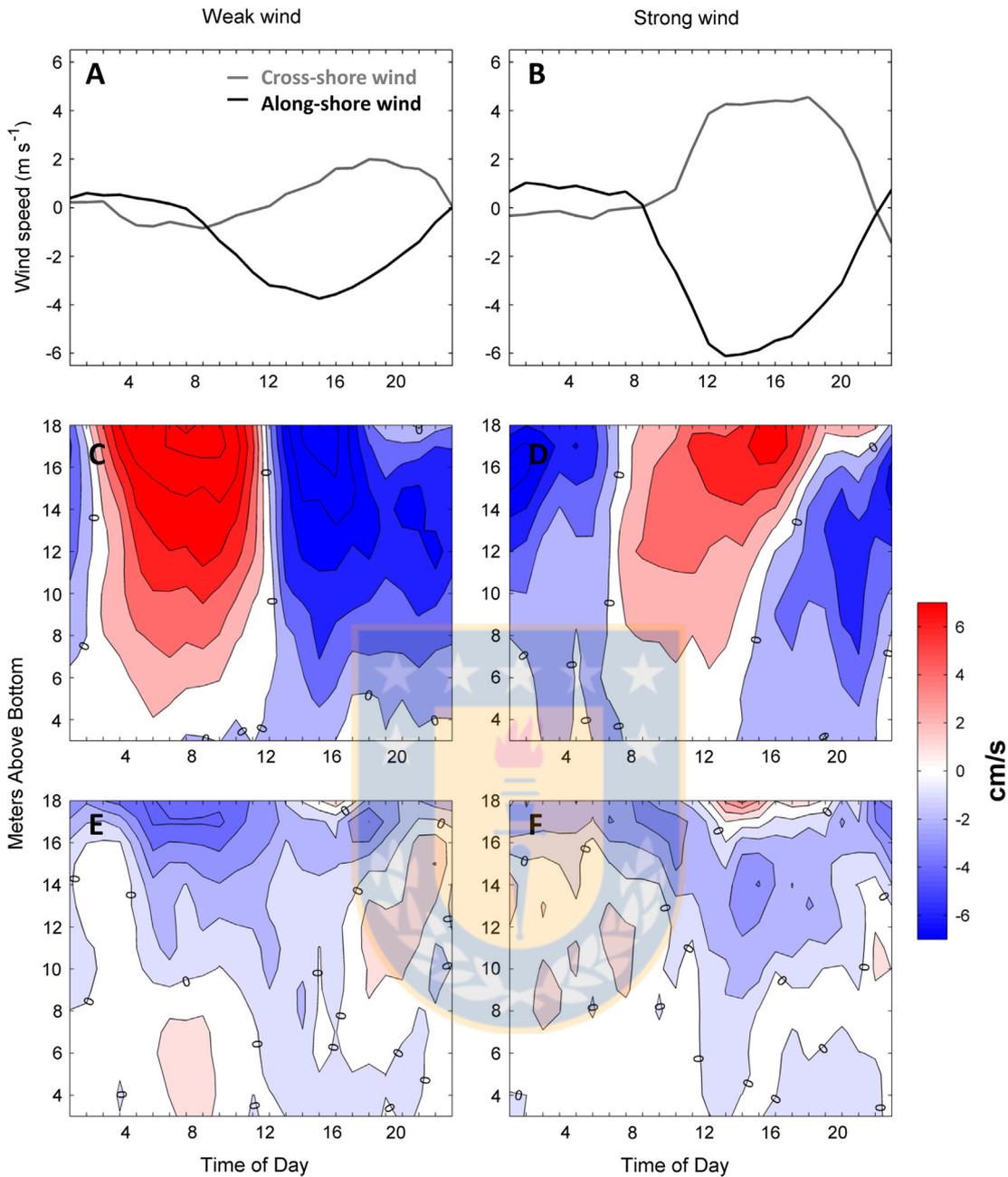
\* Statistically significant with  $\alpha=0.05$ .

#### 4. Discussion

Our observations in Cartagena Bay show that thermal structure and high-frequency variability can change over small spatial scales in a coastal upwelling system. We build on a previous study conducted in the northern part of the bay (Kaplan et al., 2003), which found that a combination of diurnal heating and sea breeze-driven transport of the surface layer accounted for large diurnal fluctuations in near-shore temperature at ECIM that are comparable with the range of seasonal fluctuations. We observe a similar signal at ECIM, confirming that diurnal forcing influences temperature throughout the 20 m water column, with semi diurnal tidal fluctuations important only near the bottom. Here we expand our understanding through ADCP



**Fig. 6.** Spatial mode of the first EOF of along-shore currents (A) and power spectrum for its temporal part (B). Same results for the first EOF of cross-shore currents are shown in panels (C) and (D).



**Fig. 7.** Canonical days computed from band-pass filtered time series (20–28 h) plus the mean of the (A,B) wind, (C, D) along-shore and (E, F) cross-shore axes during days with weak wind (left panels) and days with strong wind (right panels). Data recorded near site ECIM in November–December 2008. Red in C and D represents currents moving out of the bay and in E and F currents toward the coast of ECIM (see Fig. 1). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

observation of currents at ECIM. Further, in contrast to the focus of Kaplan et al. (2003) on sites separated by long distances and downstream from upwelling centers, here we compare thermal structure and variability between ECIM in the northern Bay and CTGN in the southern Bay, showing marked differences between sites separated by just 6 km (Fig. 1). At CTGN very weak diurnal variability is observed, with persistently warm water at the surface and temperature fluctuations at depth being dominated by semi diurnal tidal variability.

As previously described for bays in upwelling areas (Graham and Largier, 1997; Penven et al., 2000; Rosenfeld et al., 1994; Roughan et al., 2005a), the coastal upwelling jet can separate from the shoreline, resulting in a small-scale cyclonic recirculation in the upstream end of the bay. The jet (or at least one branch of it in the case of bifurcation,

e.g., Rosenfeld et al., 1994) curves into the bay and converges on the shore where it can also form an anti-cyclonic meander, exiting the downstream end of the bay (e.g., Graham and Largier, 1997; Penven et al., 2000). This appears to be the underlying low-frequency circulation in Cartagena Bay, playing out at a smaller scale. The upwelling jet flowing past Faro Panul separates from the shore and curves into the bay, converging on the shore near ECIM while establishing a recirculation that retains warm surface waters near CTGN. However, the upwelling wind that is along-shore at regional scales is onshore locally at ECIM (Fig. 3) and evidently strong enough to account for onshore advection of warmer offshore waters, which may exhibit enhanced buoyancy due to the influence of the Maipo River plume (Kaplan et al., 2003; Piñones et al., 2005). Thus, temperatures observed at ECIM and at nearby PCHC exhibit a strong

diurnal cycle (Fig. 2), as thermistors are immersed in cold upwelled waters during morning hours and in warm offshore surface waters during afternoon and evening hours owing to a strong onshore sea breeze. In contrast, this strong diurnal signal is absent near-surface at CTGN (Fig. 3F, Fig. 4) – presumably owing to the absence of strong onshore winds in the southern bay and the retention of a warm surface layer in near-shore waters. Quite likely there is a diurnal signal due to surface warming, but that would be observed at depths above the uppermost thermistor, which is about 3 m below the surface (cf., Imberger, 1985). Some diurnal variability is apparent at depth (Fig. 4), concurrent with near-bottom diurnal variability at ECIM and presumably associated with bay-scale fluctuations in thermocline depth.

Meanwhile, tidal fluctuations are observed at depth at both ECIM and CTGN, with regular intrusions of sub-thermocline water (Figs. 3 and 5). At depth at CTGN this semidiurnal variability is dominant (Fig. 3F). Further, in the absence of diurnal variability near-surface at CTGN, the influence of this semidiurnal variability is also apparent near-surface (Fig. 5). Although the signal is clear in spectra and in the canonical lunar day plots (Figs. 3 and 5), it is not possible to determine whether this is due to a propagating internal tide (due to tidal flows over complex topography offshore) or a forced response to local barotropic tidal flows over complex topography near-shore. Semidiurnal temperature variability in the bay exhibits a clear phase relationship with tidal variability in water levels (Fig. 5). The weakening of the signal towards the surface suggests that these tidal intrusions of sub-thermocline water into the bay seldom fill the water column at the 20 m moorings, i.e. the intrusion of cold water does not break the stratification and surface water remains warm.

In the northern bay, the semidiurnal tidal signal and the low-frequency along-shore flow of cold waters are superimposed by the diurnal onshore advection of warm surface waters from offshore. As recognized in prior studies, diurnal wind that is directed onshore in the afternoon (i.e. ‘sea breeze’) forces warm surface water to move onshore (Dellatorre et al., 2012; Kaplan et al., 2003); when the wind weakens during the night and early morning, warm water is no longer advected onshore and surface temperature decrease near-shore. While we recognize that the plume of the Maipo River may influence the process by which this surface layer moves onshore (Kaplan et al., 2003; Piñones et al., 2005) through enhancing the stratification and subsequent warming of the surface layers, we cannot evaluate the presence of Maipo plume waters during this study as we do not have records of near-shore surface salinity.

While a marked signal in temperatures and currents is observed at ECIM, the diurnal circulation in the northern bay appears to be a complex interaction of local wind forcing and bay-scale circulation patterns. We observed a two-layer structure in cross-shore flow with a marked diurnal periodicity and intensified under strong wind conditions (Fig. 7). Owing to the presence of strong along-shore flows it is difficult to reliably ascribe this effect to local onshore wind forcing, but the signal is consistent with that process: (i) the timing of onshore flows match the timing of onshore winds; (ii) the onshore surface flow is only 3–4 m deep, much shallower than the concomitant along-shore flow that is at least 10 m deep; (iii) during strong winds, the surface onshore flow is matched by an offshore flow at depth; and (iv) the phase relationship between onshore flow and along-shore flow varies with wind intensity (Fig. 7), but not for onshore flow. The diurnal signal in along-shore flow extends through the upper two thirds of the water column and the phase of the signal exhibits an intriguing difference between weak wind and strong wind days. On weak wind days, an along-shore flow out of the bay at dawn is associated with near-zero winds in pre-dawn hours, and an along-shore flow into the bay in late afternoon and evening is associated with an afternoon wind into the bay that turns to onshore in the

evening. During strong wind days, the along-shore bay outflow happens midday with inflow around midnight with an unchanged phase in diurnal winds – also while the stronger winds yield an intensification of onshore surface flow, they appear to yield a weakening of the along-shore flow signal. While a 3-dimensional data set is needed to understand these differences, we expect that the location where the coastal jet converges on the coast may change with local wind forcing, with stronger winds into the bay deflecting the jet more to the south-southeast, so that ECIM is left north-west of the strongest onshore transport and thus in the anticyclonic northward (out of bay) branch; whereas in weak winds the jet may be deflected less and ECIM could be located south-east of the strongest onshore transport and thus in the cyclonic southward (into bay) branch. However, irrespective of the phasing of the along-shore transport, the phasing of the diurnal signal in temperature does not change between weak and strong winds – presumably because it is associated with surface heating and onshore flows near-surface (not shown).

Cross-shore flows in near-shore systems are important for the transport of particles and chemicals between near-shore waters and the shoreline – and the most effective cross-shore flows are vertically sheared so that continuity can be respected in the cross-shore plane: onshore flow near-surface can be compensated by offshore flow at depth, or vice versa. The observation of daily onshore flow pulses at ECIM (Fig. 7) suggests a reliable mechanism for onshore transport of near-surface material and plankton that is likely missing at CTGN. For these vertically sheared cross-shore flows, transport depends on the vertical position of the particles in the water column. While the along-shore current is stronger than the cross-shore current, as in other near-shore environments (Cudaback et al., 2005; Sobarzo et al., 2010), along-shore transport does not move material any closer to shore. The weaker cross-shore currents are critical to linking near-shore waters with shoreline environments, whether driven by surface wind stress, wave radiation stress, buoyancy forcing due to land runoff, or flow-topography interactions. Further, there is a growing recognition of the importance of high-frequency processes (diurnal, semidiurnal) in the onshore transport of planktonic larvae (Jacinto and Cruz, 2008; Ladah et al., 2005; Pineda, 1999, 2000; Pineda and López, 2002; Poulin et al., 2002; Vargas et al., 2004), and thus on the spatial structure and population dynamics of species with bipartite life cycles (Pineda, 2000).

In this study we identify Cartagena Bay as a further variation on the theme of “upwelling shadows” (Graham, 1993; Graham and Largier, 1997) – areas in upwelling regions that are sheltered from the direct effects of upwelling winds and processes. As in Monterey Bay, the upstream end of Cartagena Bay is sheltered from local wind forcing, allowing a warm surface layer to persist. While Bodega Bay (Roughan et al., 2005b) is of a similar size to Cartagena Bay, and smaller than scales at which Coriolis effects are typically important, it also exhibits recirculation – but only at depth as the surface of the bay is not sheltered from wind forcing as is Cartagena Bay. Thus the sheltered southern end of the bay is characterized by a persistent warm surface layer regardless of sea breeze conditions. This layer is only briefly broken down following a few days of strong winds (21–23 December 2011 – Fig. 3), evidently not due to the direct effect of wind but due to intrusion of cold waters into the bay at depth (18–22 December 2011) that eventually overwhelms the stratification in the southern corner.

## 5. Conclusions

This study of Cartagena Bay demonstrates the presence of small-scale spatial structure in thermal stratification and variability in upwelling regions. Specifically, the exposed coast and near-shore

waters in the northern end of the Bay are contrasted with the sheltered coast and near-shore waters in the southern Bay. At the northern site, diurnal changes between upwelled and warm offshore surface waters are observed, associated with onshore winds in the afternoon, whereas at the southern site, which is sheltered from winds, a resident warm surface layer is observed. While material may be retained in the surface layer in the south, in the north material in the surface layer is regularly exchanged with offshore waters and also can be transported to the shoreline by onshore surface flow each afternoon. These are critical spatial differences in a small bay, with first-order influence on larval transport, algal blooms, and dispersion of land-based pollution. To fully resolve the underlying differences in transport and mixing, a three-dimensional study of bay circulation is needed.

## Acknowledgments

We thank Randy Finke, Fredy Veliz, Jose Pantoja, Hagen Buck-Wiese, Cristina Stuardo, Bryan Bularz, Ricardo Calderón, Miriam Fernández, Catherine Gonzalez and Manuel Menares who helped with fieldwork and gathering data used in this study. We specially thank Cristina Stuardo, Bryan Bularz, Paula Pappalardo and Jonathan Cedeño who provided great insights to the discussion and the analysis of the data. The fieldwork was supported by FONDECYT Grant 3070014 to FT, and by a MECESUP fellowship (UCO0602) granted to JB. Important funds that allowed us to generate time series of wind, SST and currents at ECIM have been provided by Grants to SAN from Fondecyt, especially Fondecyt 1120158, and from Centro de Conservación Marina Iniciativa Científica Milenio of the Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. Partial support for JB, FT, and CM was also provided by CONICYT through the COPAS Sur-Austral Program PFB-31.

## References

- Cudaback, C.N., Washburn, L., Dever, E., 2005. Subtidal inner-shelf circulation near Point Conception, California. *J. Geophys. Res.* 110, C10007. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JC002608>.
- Dellatorre, F.G., Pisoni, J.P., Barón, P.J., Rivas, A.L., 2012. Tide and wind forced nearshore dynamics in Nuevo Gulf (Northern Patagonia, Argentina): potential implications for cross-shore transport. *J. Mar. Syst.* 96–97, 82–89.
- Figueroa, D., Moffat, C., 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophys. Res. Lett.* 27 (23), 3905–3908.
- Graham, W.M., 1993. Spatio-temporal scale assessment of an “Upwelling Shadow” in Northern Monterey Bay, California. *Estuaries* 16 (1), 83–91.
- Graham, W.M., Largier, J.L., 1997. Upwelling shadows as nearshore retention sites: the example of northern Monterey Bay. *Cont. Shelf Res.* 17, 509–532.
- Imberger, J., 1985. The diurnal mixed layer. *Limnol. Oceanogr.* 30, 737–770.
- Jacinto, D., Cruz, T., 2008. Tidal settlement of the intertidal barnacles *Chthamalus* spp. in SW Portugal: interaction between diel and semi-lunar cycles. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 366, 129–135.
- Kaplan, D.M., Largier, J.L., Navarrete, S.A., Guiñez, R., Castilla, J.C., 2003. Large diurnal temperature fluctuations in the nearshore water column. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 57, 385–398.
- Ladah, L.B., Tapia, F.J., Pineda, J., López, M., 2005. Spatially heterogeneous, synchronous settlement of *Chthamalus* spp. larvae in northern Baja California. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 302, 177–185.
- Lentz, S.J., 1995. Sensitivity of the inner-shelf circulation to the form of the eddy-viscosity profile. *J. Phys. Oceanogr.* 25, 19–28.
- Lentz, S.J., Fewings, M.R., 2012. The wind- and wave-driven inner-shelf circulation. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 4, 317–343.
- Morgan, S.G., Fisher, J.L., Mace, A.J., Akins, L., Slaughter, A.M., Bollens, S.M., 2009. Cross-shelf distributions and recruitment of crab postlarvae in a region of strong upwelling. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 380, 173–185.
- Morgan, S.G., Fisher, J.L., McAfee, S.T., Largier, J.L., Halle, C.M., 2012. Limited recruitment during relaxation events: larval advection and behavior in an upwelling system. *Limnol. Oceanogr.* 57 (2), 457–470.
- Narváez, D.A., Poulin, E., Leiva, G., Hernández, E., Castilla, J.C., Navarrete, S.A., 2004. Seasonal and spatial variation of nearshore hydrographic conditions in central Chile. *Cont. Shelf Res.* 24, 279–292.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Comput. Geosci.* 28, 929–937.
- Penven, P., Roy, C., Colin de Verdière, A., Largier, J., 2000. Simulation of a coastal jet retention process using a barotropic model. *Oceanol. Acta* 23, 615–634.
- Pineda, J., 1999. Circulation and larval distribution in internal tidal bore warm fronts. *Limnol. Oceanogr.* 44 (6), 1400–1414.
- Pineda, J., 2000. Linking larval settlement to larval transport: assumptions, potentials, and pitfalls. *Oceanogr. East. Pac.* 1, 84–105.
- Pineda, J., López, M., 2002. Temperature, stratification and barnacle larval settlement in two Californian sites. *Cont. Shelf Res.* 22, 1183–1198.
- Pineda, J., Porri, F., Starczak, V., Blythe, J., 2010. Causes of decoupling between larval supply and settlement and consequences for understanding recruitment and population connectivity. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 392, 9–21.
- Piñones, A., Valle-Levinson, A., Narváez, D.A., Vargas, C.A., Navarrete, S.A., Yuras, G., Castilla, J.C., 2005. Wind-induced diurnal variability in river plume motion. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 65, 513–525.
- Poulin, E., Palma, A.T., Leiva, G., Narváez, D., Pacheco, R., Navarrete, S.A., Castilla, J.C., 2002. Avoiding offshore transport of competent larvae during upwelling events: the case of the gastropod *Concholepas concholepas* in Central Chile. *Limnol. Oceanogr.* 47, 1248–1255.
- Rosenfeld, L.K., Schwing, F.B., Garfield, N., Tracy, D.E., 1994. Bifurcated flow from an upwelling center: a cold water source for Monterey Bay. *Cont. Shelf Res.* 14, 931–964.
- Roughan, M., Terrill, E.J., Largier, J.L., Otero, M.P., 2005a. Observations of divergence and upwelling around Point Loma, California. *J. Geophys. Res.* 110, C04011. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JC002662>.
- Roughan, M., Mace, A.J., Largier, J.L., Morgan, S.G., Fisher, J.L., Carter, M.L., 2005b. Subsurface recirculation and larval retention in the lee of a small headland: a variation on the upwelling shadow theme. *J. Geophys. Res.* 110, C10027. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JC002898>.
- Sobarzo, M., Bravo, L., Moffat, C., 2010. Diurnal-period, wind-forced ocean variability on the inner shelf off Concepción, Chile. *Cont. Shelf Res.* 30, 2043–2056.
- Strub, P.T., Mesías, J.M., Montecino, V., Rutlant, J., Salinas, S., 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.), *The Sea. E – Publishing Inc.*, New York, pp. 273–313.
- Tapia, F.J., Navarrete, S.A., Castillo, M., Menge, B.A., Castilla, J.C., Largier, J., Wieters, E.A., Broitman, B.L., Barth, J.A., 2009. Thermal indices of upwelling effects on inner-shelf habitats. *Prog. Oceanogr.* 83, 278–287.
- Valle-Levinson, A., Atkinson, L.P., Figueroa, D., Castro, L., 2003. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay: Gulf of Arauco, Chile. *J. Geophys. Res.* 108 (C2), 3054. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JC001272>.
- Vargas, C.A., Narváez, D.A., Piñones, A., Venegas, R.M., Navarrete, S.A., 2004. Internal tidal bore warm fronts and settlement of invertebrates in central Chile. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 61, 603–612.
- Vargas, C.A., Narváez, D.A., Piñones, A., Navarrete, S.A., Lagos, N.A., 2006. River plume dynamic influences transport of barnacle larvae in the inner shelf off central Chile. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 86, 1057–1065.
- Wieters, E.A., Kaplan, D.M., Navarrete, S.A., Sotomayor, A., Largier, J., Nielsen, K.J., Véliz, F., 2003. Alongshore and temporal variability in chlorophyll *a* concentration in Chilean nearshore waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 249, 93–105.
- Woodson, C.B., Eerkes-Medrano, D.I., Flores-Morales, A., Foley, M.M., Henkel, S.K., Hession-Lewis, M., Jacinto, D., Needles, L., Nishizaki, M.T., O’Leary, J., Ostrander, C.E., Pespeni, M., Schwager, K.B., Tyburczy, J.A., Weersing, K.A., Kirincich, A.R., Barth, J.A., McManus, M.A., Washburn, L., 2007. Local diurnal upwelling driven by sea breezes in northern Monterey Bay. *Cont. Shelf Res.* 27, 2289–2302.

#### 4.2. Forzamiento del viento sobre la variabilidad diurna de la temperatura y el patrón espacial del asentamiento de cirripedios intermareales dentro de una bahía.

*Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 461: 350 – 356, 2014.

#### Resumen

En este estudio se evaluó la variabilidad de la temperatura bajo diferentes condiciones de viento y su relación con el patrón espacial del asentamiento de tres especies de cirripedios - los chthamalidos *Jehlius cirratus* y *Notochthamalus scabrosus*, y el balanido *Notobalanus flosculus* – en la bahía de Cartagena, ubicada a sotavento del centro de surgencia Punta Toro en la costa de Chile central. Durante días con viento fuerte la señal diurna de la temperatura superficial se atenúa en el extremo sur de la bahía (sitio CTGN), y más protegido del viento, y se desacopla de lo observado en el extremo norte (sitios ECIM y PCHC), y más expuesto al viento, lo cual sugiere que la intensidad del viento modula el patrón espacial de las condiciones hidrográficas y de los posibles mecanismos físicos que generan transporte en la bahía. En general la tasa promedio del asentamiento de ambos chthamalidos fue más alta en PCHC, sin embargo la tasa promedio de *N. flosculus* fue más alta en CTGN. Bajo condiciones de viento fuerte las tasas de ambos chthamalidos disminuyeron en los sitios del norte, mientras que el asentamiento de *N. flosculus* alcanzó los valores más bajos en todos los sitios de estudio durante esta condición de viento. Por otro lado el efecto del stress de viento sobre el patrón espacial del asentamiento difiere entre las especies. Solo la especie *J. cirratus* mostró una correlación positiva y significativa entre el patrón espacial del asentamiento y el máximo diario del stress de viento – utilizado como indicador de la intensidad de la brisa marina. En este estudio se concluye que los cambios diarios en el stress de viento tienen un fuerte y consistente efecto sobre el patrón espacial de las fluctuaciones diurnas de temperatura del agua y sobre el patrón espacial del asentamiento de cirripedios en la bahía de Cartagena. Estos resultados sugieren que dicha asociación surge del efecto del viento sobre la circulación local y, por extensión, sobre los mecanismos que determinan el transporte de larvas en esta y otras bahías con características similares que se encuentran en regiones de surgencia.



# Wind-driven diurnal temperature variability across a small bay and the spatial pattern of intertidal barnacle settlement



Jessica Bonicelli<sup>a,c</sup>, Fabian J. Tapia<sup>b,c,\*</sup>, Sergio A. Navarrete<sup>d,e</sup>

<sup>a</sup> Programa de Postgrado en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile

<sup>b</sup> Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

<sup>c</sup> Programa COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

<sup>d</sup> Estación Costera de Investigaciones Marinas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

<sup>e</sup> Center for Marine Conservation, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 25 August 2014

Received in revised form 7 September 2014

Accepted 9 September 2014

Available online xxxx

### Keywords:

Barnacle larvae

Bay

Settlement

Spatial pattern

Temperature variability

Wind

## ABSTRACT

Temperature variability under different wind conditions and its association with the spatial pattern of settlement of three intertidal barnacles – the chthamaloids *Jehlius cirratus* and *Notochthamalus scabrosus*, and the balanoid *Notobalanus flosculus* – were studied across Cartagena Bay, located in the upwelling region of central Chile. During days of strong winds, the diurnal signal in surface temperature at the protected end of the bay (site CTGN) was attenuated and decoupled from the northern sites (ECIM and PCHC) which are directly exposed to wind forcing, suggesting that wind intensity drives shifts in the relative importance of physical transport processes across the bay. Overall, the mean settlement rates of both chthamaloids were higher at PCHC, whereas *N. flosculus* settled at higher rates in CTGN. Under strong wind conditions, settlement rates of both chthamaloids decreased at the northern sites, while the settlement of *N. flosculus* reached minima at all three sites. Moreover, the effect of wind stress on the spatial pattern of settlement across the bay differed between species. A significant and positive correlation between the spatial heterogeneity of settlement and maximum daily wind stress – used as a metric for the intensity of the afternoon sea breeze – was found only for *J. cirratus*. It is concluded that daily changes in wind stress have a strong effect on the spatial pattern of diurnal temperature fluctuations, and on the spatial pattern of barnacle settlement around the bay. Such association emerges from the effect of wind on near-shore circulation and its differential modulation of thermal structure around an open embayment and, by extension, on the patterns of larval transport and onshore delivery to sites located at extremes of the bay, which probably is common in other bays with similar characteristics.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Over the years, many studies have attempted to link the patterns of larval transport and settlement in marine benthic species with coastal physical processes (Lagos et al., 2008; Pineda, 1991; Pineda and López, 2002; Roughgarden et al., 1988; Shanks, 2009; Vargas et al., 2004; Wing et al., 1995). The interest stems from the fact that patterns of coastal circulation and larval transport can influence the structure and functioning of individual populations (Roughgarden et al., 1988), interacting species (Aiken and Navarrete, 2014; Salomon et al., 2010) and benthic communities (Caro et al., 2010), through their effect on the spatial pattern and timing of larval delivery to near-shore environments. Since planktonic larval stages of benthic invertebrates are small and have limited capabilities for horizontal swimming – relative to the typical speeds of surface currents in the coastal ocean – the

cross-shore transport of invertebrate larvae is thought to be strongly modulated by physical processes (e.g. Cudaback et al., 2005; Kaplan and Largier, 2006; Kirincich et al., 2005).

Near-shore circulation is highly complex and variable, both temporally and spatially, due to the combined forcing of various physical processes and their interaction with coastal topography (e.g. Kirincich et al., 2005; Lentz and Fewings, 2012; Sobarzo et al., 2010). Along eastern-boundary regions, circulation on the continental shelf is largely influenced by wind-driven coastal upwelling, which dominates cross-shelf transport of water, its properties, and suspended particles over synoptic timescales. Synoptic variability and the seasonal variation in coastal winds that characterizes most temperate systems, have been the focus of most ‘supply-side’ studies. However, substantial variability in circulation and transport may result from diurnal fluctuations in wind forcing, i.e. over 24-hour cycles. The sea breeze, perceived in mid to low latitudes as an afternoon intensification of onshore winds, has been identified as one of the most important processes that modulate the thermal structure of the water column and circulation in near shore environments with a regular diurnal periodicity (Bonicelli et al., 2014;

\* Corresponding author at: Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. Tel.: +56 41 2207284.  
E-mail address: [ftapiaj@udec.cl](mailto:ftapiaj@udec.cl) (F.J. Tapia).

Dellatorre et al., 2012; Kaplan et al., 2003; Sobarzo et al., 2010; Tapia et al., 2004; Woodson et al., 2007). A number of studies have focused on diurnal variability in cross-shelf transport and settlement patterns (e.g. Jacinto and Cruz, 2008; Kaplan et al., 2003; Tapia et al., 2004), in an attempt to assess the effect of physical processes with a strong diurnal signal on larval transport in coastal environments. Establishing this connection is especially important for the understanding of mechanisms and scales of variability that shape settlement patterns of invertebrate species in subtidal and intertidal environments.

Recently published studies have documented the effects of diurnal fluctuations in wind forcing on local circulation in temperate bays embedded in upwelling regions (e.g. Bonicelli et al., 2014; Woodson et al., 2007). Work centered on small open bays provides a unique opportunity to study the effect that spatial changes in the interaction of wind and coastline configuration may have on nearshore circulation, and the resulting spatial changes in larval transport, onshore larval settlement, and population renewal in many species of coastal invertebrates.

Cartagena Bay is a small south-facing open embayment bay located in the lee (20 km north) of the Punta Toro upwelling center in central Chile (Narváez et al., 2004; Wieters et al., 2003). Diurnal wind variability has a strong influence on temperature variability and circulation around the bay (Kaplan et al., 2003; Narváez et al., 2004; Piñones et al., 2005). Surface waters tend to be warmer and the water column is usually more strongly stratified within this bay (Kaplan et al., 2003; Narváez et al., 2004). A recent study (Bonicelli et al., 2014) showed that patterns of diurnal variability in water-column temperatures may vary substantially across the bay, with a strong diurnal signal at the northern and more exposed end, and persistent stratification at the southern and more protected end, despite the strong sea breeze that develops during the afternoon (see Kaplan et al., 2003; Piñones et al., 2005). This spatial heterogeneity in temporal variability of water-column temperatures, largely induced by differential forcing of diurnal winds, may affect meroplankton distribution by modifying cross-shore transport processes, and ultimately may affect spatial patterns of larval settlement at the shoreline.

A previous study conducted in Cartagena Bay over three consecutive spring–summer seasons (Tapia and Navarrete, 2010) showed inter-annual changes in the persistence of spatial pattern in settlement, and hypothesized that such change could arise from inter-annual variation in coastal wind, through its effect on local circulation and larval supply to intertidal habitats. Here, the same set of daily settlement observations is used together with time series of water temperature and wind stress, to assess whether daily wind variability affects the spatial pattern of settlement of 3 intertidal barnacles (*Jehlius cirratus*, *Notochthamalus scabrosus*, and *Notobalanus flosculus*) around Cartagena Bay. Based on previous work (Bonicelli et al., 2014), it was hypothesized that changes in wind conditions affect settlement patterns by way of their effect on circulation and larval transport around the bay. Such changes in near-shore circulation should be reflected by changes in the pattern of temperature variability around the bay.

## 2. Material and methods

### 2.1. Barnacle settlement and study sites

Daily records of larval settlement rates were estimated for three species of intertidal barnacles which are numerically dominant in the mid to low intertidal zone of wave exposed rocky shores around Cartagena Bay: the chthamaloids *J. cirratus* and *N. scabrosus*, and the balanoid *N. flosculus*.

Settlement observations were conducted daily and simultaneously at three sites spanning Cartagena Bay on three consecutive spring to early summer seasons (October–December, 2006–2008), and for an average of 57 consecutive days. Settlement was monitored using  $10 \times 10$  cm Plexiglas plates covered with a gray rubbery surface

(Safety-walk, 3M), and attached to the substrate with stainless steel screws (see Tapia and Navarrete, 2010 for more details). Two sites (ECIM, PCHC) were located at the northern end of the bay, whereas a third site (CTGN) was located at the southern end (Fig. 1).

### 2.2. Environmental data

Wind data for October 2006 through December 2008 were obtained from a meteorological station maintained by the Chilean Navy's DIRECTEMAR at the lighthouse Faro Panul, located 3 km south of the southern end of the bay and at 30 m above sea level ( $33^{\circ} 34.898'S$ ,  $71^{\circ} 37.160'W$ ) (Fig. 1). Records of shallow subtidal water temperature were gathered at all three sites using Stowaway TidBit loggers (Onset Computer Corp., USA) that were programmed to record temperature at 5 min intervals. Loggers were installed at 1 m below the Mean Lower Low Water (MLLW) from October 2006 until December 2008 (Fig. 1).

### 2.3. Data processing and analysis

Wind velocity vectors were rotated according to the wind's principal axis of variability. In this rotated coordinate system, the along-shore component of wind ( $y$ ) is positive toward the northeast, whereas the cross-shore component ( $x$ ) is positive toward the southeast (Fig. 1). Wind stress was then calculated following Large and Pond (1981).

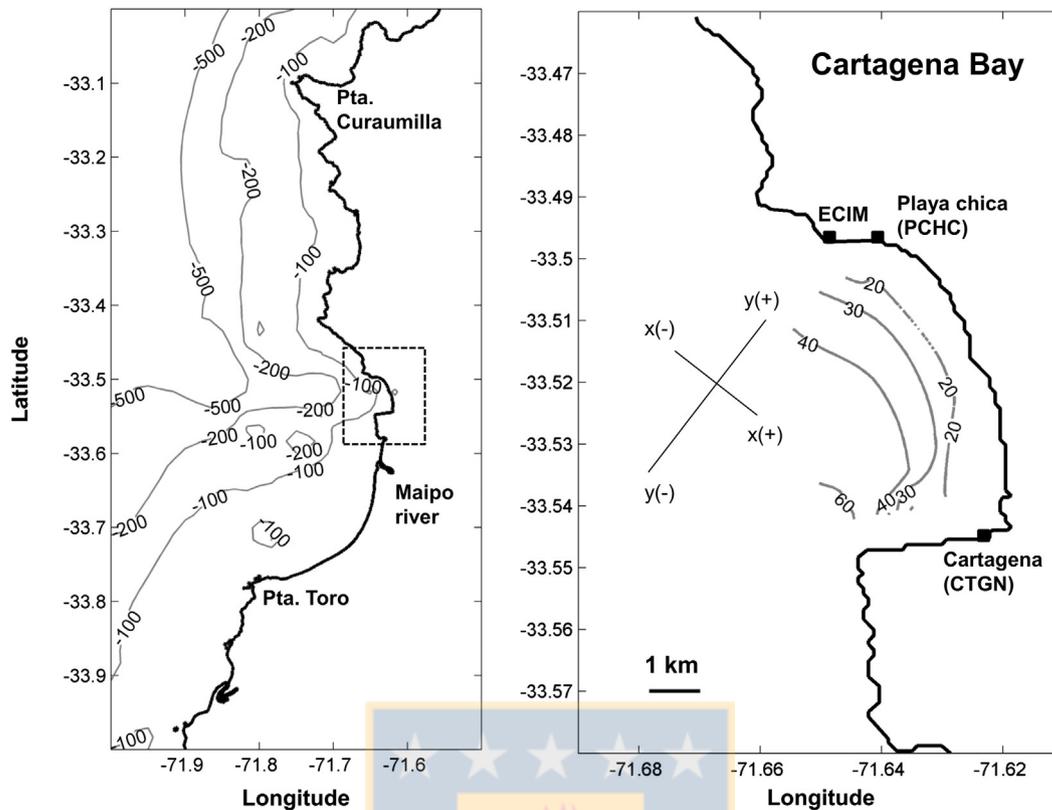
Daily maxima for alongshore wind stress ( $\tau_{ym}$ ), recorded over the three consecutive settlement seasons, were used to classify days with temperature and settlement data into three categories according to their frequency distribution (Fig. 2): (1) “strong wind” days when stress was equal or greater than the 75th percentile of the distribution ( $\tau_{ym} \geq 0.06 \text{ N m}^{-2}$ ), (2) “moderate wind” days when wind stress was between the 25th and 75th percentiles of the distribution ( $0.01 \text{ N m}^{-2} < \tau_{ym} < 0.06 \text{ N m}^{-2}$ ), and (3) “weak wind” days when wind stress was equal or less than the 25th percentile of the distribution ( $\tau_{ym} \leq 0.01 \text{ N m}^{-2}$ ). To characterize the daily cycle in surface water temperature and its spatial variability as a result of wind changes, the canonical day was computed for each site under different wind conditions. Daily amplitudes in water temperature were also calculated and compared between sites for each wind scenario. Amplitudes were determined via the least-squares fitting of a sinusoidal polynomial to each temperature signal.

To evaluate the effect of wind intensity on the among-site synchrony of settlement, Kendall correlations between settlement rates at pairs of sites were computed for each wind condition (weak, moderate, strong). Positive and significant correlation may reflect synchrony in the timing of settlement across the bay. Only days with 12 or more larvae collected across the three sites were used for this analysis.

In order to evaluate the effect of wind stress on the spatial pattern of settlement, a spatial coefficient of variation (SCV) was computed and used as a proxy for the heterogeneity of barnacle settlement. The SCV was calculated between the settlement rates of the three sites on days with 12 or more settlers collected across the three sites. Since 4 plates were used to monitor settlement at each of the 3 sites, a minimum of 12 settlers corresponds to the count that would be found if settlement was completely homogeneous, i.e. one larva per settlement plate. For each day with settler counts meeting this criterion (118, 128, and 108 days for *J. cirratus*, *N. scabrosus*, and *N. flosculus*, respectively), a daily maximum for alongshore wind stress and the cumulative alongshore wind stress for the period of collector deployment were computed. Spearman's rank correlations between wind statistics and the SCV were then calculated for the three species.

## 3. Results

Canonical days for water temperatures recorded on days with weak, moderate, and strong wind showed that surface waters cooled



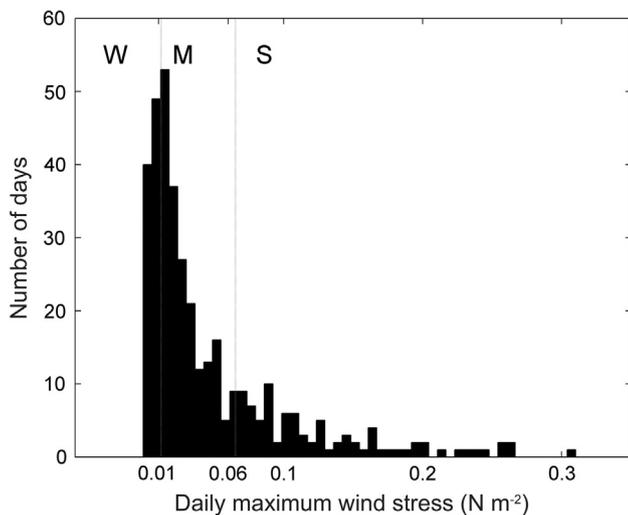
**Fig. 1.** Location of Cartagena Bay on the coast of central Chile (dashed square, left panel) and the 3 sites where settlement observations were collected (right panel): ECIM (Estación Costera de Investigaciones Marinas), PCHC (Playa Chica), and CTGN (Cartagena). Local bathymetry and the location of Faro Panul meteorological station, along with the coordinate system adopted to rotate wind velocity vectors (black axes), are also shown in the right panel.

throughout the bay as wind intensified, with the lowest mean temperatures at all three sites on days with strong wind conditions (Fig. 3). In general, temperatures were lowest at 8:00 (local time, GMT-4) and then increased to reach maximum values in the afternoon (Fig. 3). While temperature variability had a strong diurnal signal and exhibited greater diurnal amplitude at the northern sites (ECIM and PCHC), it was attenuated under all wind conditions at the southern site (CTGN).

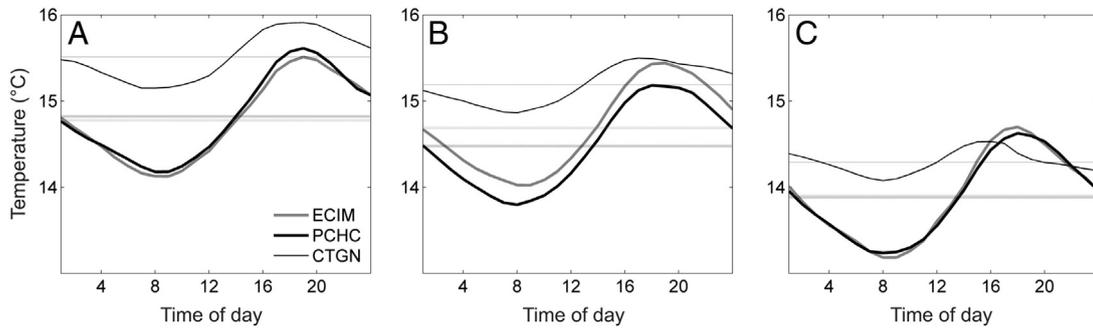
Highest temperatures at CTGN were higher, and were reached at an earlier hour than at both northern sites under all wind conditions (Fig. 3).

Although there was a persistent difference between extremes of the bay in the mean and diurnal variability of temperature under all wind conditions, this difference was accentuated on days with strong wind (Fig. 3). On weak wind days, CTGN was on average 1 °C warmer than ECIM and PCHC during the morning, and then these across-bay differences decreased to 0.5 °C during the afternoon (Fig. 3A). On moderate wind days, between-site differences in temperature were comparable to those observed under weak winds, although afternoon temperatures were more similar across the bay (Fig. 3B). On strong wind days, a diurnal fluctuation in temperature was apparent at both northern sites and it was practically nonexistent at CTGN, with only a slight increase in temperature (0.2 °C) between 13:00 and 16:00 (Fig. 3C). Also, and in contrast with the other wind scenarios, on days with strong winds the late-afternoon temperature at both northern sites was higher than at CTGN (ca. 0.3 °C between 18:00 and 20:00, Fig. 3C). Diurnal fluctuations in temperature were significantly correlated across the bay on days with weak and moderate winds, and were decoupled between the northern sites and CTGN on days with strong winds (Table 1).

Overall settlement rates for both chthamaloid species (*J. cirratus* and *N. scabrosus*) were higher at PCHC, whereas settlement of the balanoid *N. flosculus* was higher at CTGN (Fig. 4). For both chthamaloids, settlement rates were lower at the northern sites on days with strong winds. At PCHC, this drop in settlement was more apparent for *J. cirratus* (Fig. 4B) than for *N. scabrosus* (Fig. 4E). At CTGN, on the other hand, the settlement rates of *J. cirratus* (Fig. 4C) and *N. scabrosus* (Fig. 4F) were similar and apparently unaffected by wind conditions. As for settlement of *N. flosculus*, it appeared that wind stress had no effect on its magnitude or spatial pattern, since the mean settlement rate at all three sites was highest under weak wind conditions than during moderate and strong wind conditions (Fig. 4G, H, I).



**Fig. 2.** Frequency distribution for the daily maxima of alongshore wind stress recorded over three spring-summer seasons: October 2006–February 2007, October 2007–February 2008, and October 2008–December 2008. Vertical lines indicate the 25th and 75th percentiles, which were used as criteria to classify wind conditions on a given day as weak (W), moderate (M), or strong (S).



**Fig. 3.** Canonical days computed from the time series of shoreline temperatures recorded during three consecutive spring–summer seasons at the northern (ECIM: gray line; PCHC: thick black line) and southern (CTGN: thin black line) sites in Cartagena Bay on days with weak (A), moderate (B) and strong (C) wind conditions. Dotted horizontal lines show the mean temperature at each site for each wind condition.

Settlement rates of *J. cirratus* were positively correlated between sites under weak and moderate winds but not between ECIM and CTGN on days with strong wind (Fig. 5A). Among-site correlations for *N. scabrosus* were positive and significant under moderate winds but not during weak winds. On days with strong winds, settlement of *N. scabrosus* was not correlated between CTGN and ECIM (Fig. 5B). Spatial correlations for the balanoid *N. flosculus* were positive and significant among all three sites under the three wind conditions (Fig. 5C), although the correlation between ECIM and CTGN decreased on days with strong wind.

The spatial coefficient of variation (SCV) in settlement, used here as a metric for spatial heterogeneity, was positively correlated with the daily maximum wind stress in *J. cirratus* but not in the other two species (Fig. 6A). The SCV was not significantly correlated with cumulative wind stress for any of the three species (Fig. 6B).

**4. Discussion**

Results presented here show that spatial differences in thermal variability and the heterogeneity of barnacle settlement around a small bay increase when the wind stress intensifies. In a recent study conducted in this bay, Bonicelli et al. (2014) showed that thermal structure and its high-frequency variability (minutes to hours) differ significantly between northern and southern sites, and suggested that this spatial difference results from the combined effect of upwelling driven circulation, diurnal wind variability and local topography. Here, that work is expanded upon by comparing temperature variability under different wind conditions, and by coupling these changes with the spatial pattern of barnacle settlement around the bay.

Numerous studies conducted over the past decades have focused on establishing which of the many physical processes affecting coastal circulation and larval delivery to intertidal habitats are more important

in shaping settlement and recruitment patterns (e.g. Connolly and Roughgarden, 1999; Farrell et al., 1991; Lagos, 2005, 2008; Roughgarden et al., 1988). This is an important ecological question that has implications for the understanding of marine population dynamics, as well as for the design and management of marine reserves (Gaines et al., 2003; Largier, 2003; Shanks et al., 2003). Here it has been shown that even across a small bay (6 km) the spatial pattern of barnacle settlement may be heterogeneous and strongly dependent on wind stress variability.

As it has been shown for other bays located in the lee of upwelling centers, stronger upwelling-favorable winds enhance the retention of surface water, and intensify the horizontal gradient of water temperature inside the bay, producing a set of conditions known as “upwelling shadow” (Graham and Largier, 1997). Additionally, in certain bays a strong sea breeze may enhance the onshore transport of warm surface water and its vertical mixing during the afternoon (Kaplan et al., 2003; Piñones et al., 2005; Tapia et al., 2004). At Cartagena Bay, diurnal-scale effects of the sea breeze on surface temperatures appear to be superimposed on synoptic-scale patterns of near-shore circulation and surface water retention (e.g. Bonicelli et al., 2014). Strong upwelling-favorable winds enhance water retention and attenuate the diurnal temperature cycle near the southern, more protected site (CTGN) while the sea breeze enhances the afternoon warming at the northern sites and more exposed to wind forcing (ECIM and PCHC). The fact that across-bay differences in the amplitude of diurnal temperature fluctuations were significant only on days with strong wind (Table 1) supports this interpretation of the data.

In addition to enhanced retention, the attenuation of diurnal temperature cycles at CTGN (Fig. 3C) indicates that strong wind conditions also enhance stratification and stability of the water column at the protected end of the bay. On the other hand, at the exposed end of the bay, the strong diurnal signal in temperature (Fig. 3) reflects stronger advection and a well-mixed water column. These spatial changes in stratification could affect the vertical distribution of larvae in the water column (Daigle and Metaxas, 2011, 2012) and therefore affect their transport and subsequent delivery to intertidal habitats. Additionally, spatial differences in near-shore stratification could produce spatial differences in larval delivery to shore by way of differential conditions for the onshore propagation of nonlinear internal waves; with more frequent internal tidal bore events at sites more strongly stratified (Pineda, 1991, 1995). It has been shown that places with contrasting incidence of internal tidal bores may exhibit large differences in barnacle settlement, due to differential onshore transport of larvae (Pineda and López, 2002). An eventual drop in thermal stratification driven by the diurnal sea breeze should be stronger at ECIM on days with strong wind, and consequently may reduce the onshore delivery of *J. cirratus* larvae (Fig. 4A), while at CTGN the settlement of this species does not seem to respond to changes in maximum wind stress (Fig. 4C). This could be explained by the persistent stratification observed at CTGN even during days with strong wind (Bonicelli et al., 2014). Also, the

**Table 1**  
Among-site correlations (Pearson's coefficient) in the diurnal amplitude of water temperature under conditions of weak, moderate and strong wind stress. Significant correlations are shown in bold.

	ECIM	PCHC	CTGN
<i>Weak winds</i>			
ECIM	1		
PCHC	<b>0.86</b>	1	
CTGN	<b>0.48</b>	<b>0.46</b>	1
<i>Moderate winds</i>			
ECIM	1		
PCHC	<b>0.88</b>	1	
CTGN	<b>0.49</b>	<b>0.53</b>	1
<i>Strong winds</i>			
ECIM	1		
PCHC	<b>0.89</b>	1	
CTGN	0.04	0.02	1

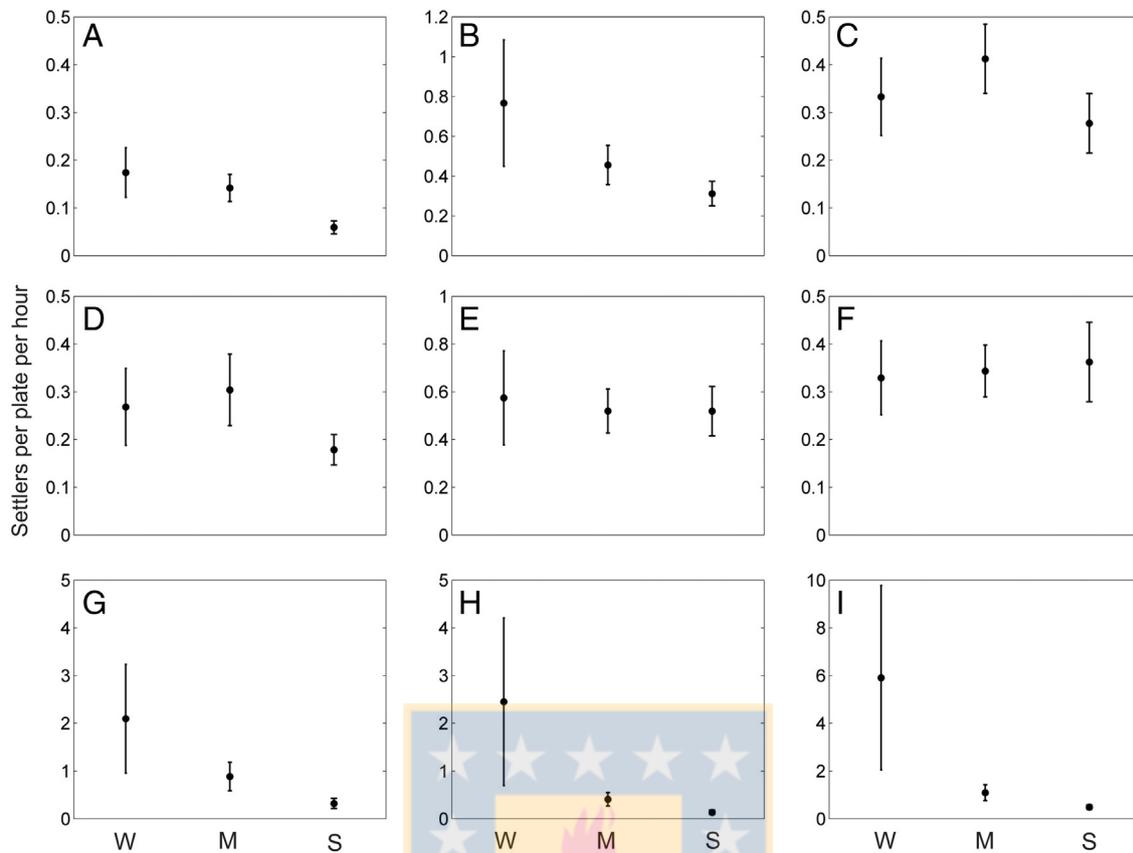


Fig. 4. Mean settlement rates (individuals per plate per hour) for *J. cirratus* (A, B, C), *N. scabrosus* (D, E, F) and *N. flosculus* (G, H, I) under conditions of weak (W), moderate (M), and strong winds (S). Scales on the y axes were adjusted to emphasize the within-species and within-site comparison of settlement rates.

apparent contrast in local stratification/mixing around the bay under strong winds could generate contrasting conditions for the occurrence of physical phenomena that mediate onshore transport, which may alter the timing of larval arrival to intertidal habitats (e.g. Pineda et al., 2010). This may explain the lack of spatial synchrony in the timing of settlement observed for *J. cirratus* on strong wind days (Fig. 5A), and the positive and significant correlation between its spatial pattern of settlement (i.e. SCV) and the maximum daily wind stress (Fig. 6A). It is noteworthy that the SCV of *J. cirratus* was significantly correlated with the daily maximum of alongshore wind stress, but not with cumulative wind stress. This discrepancy may be explained by the fact that, while maximum daily wind stress is a proxy for the intensity of the afternoon sea breeze (Bonicelli et al., 2014), the cumulative wind stress integrates wind variability over the full daily cycle, including the evening and early morning hours with weak or even negative (i.e. southwestward) wind stress. Thus, the computation of cumulative wind stress would attenuate or even mask the signal of the sea breeze, which

according to this and previous work is the main driver of circulation and water-column stratification within the bay (Bonicelli et al., 2014).

These results demonstrated that, at least for *J. cirratus*, diurnal wind-driven flows and their interaction with the bay topography would be shaping the pattern of local circulation, larval delivery to intertidal habitats, and larval settlement. However the spatial pattern of settlement in *N. scabrosus* does not appear to respond as directly to wind forcing. While other studies performed in the same region demonstrated that the meso-scale spatial variation of recruitment of *J. cirratus* and *N. scabrosus* resembles the temperature variability induced by coastal upwelling (Lagos et al., 2005, 2008), here it has been found that diurnal variability in wind stress appears to influence the spatial pattern of settlement only for *J. cirratus* but not for *N. scabrosus* (Fig. 6). Based on these results and those obtained by Lagos et al. (2005), it can be concluded that larger-scale physical processes such as coastal upwelling could modulate the meso-scale spatial patterns of recruitment of both chthamaloids, but high-frequency processes operating at smaller spatial

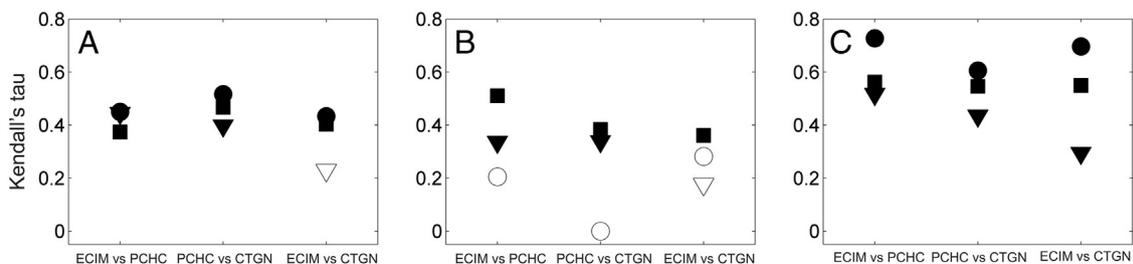
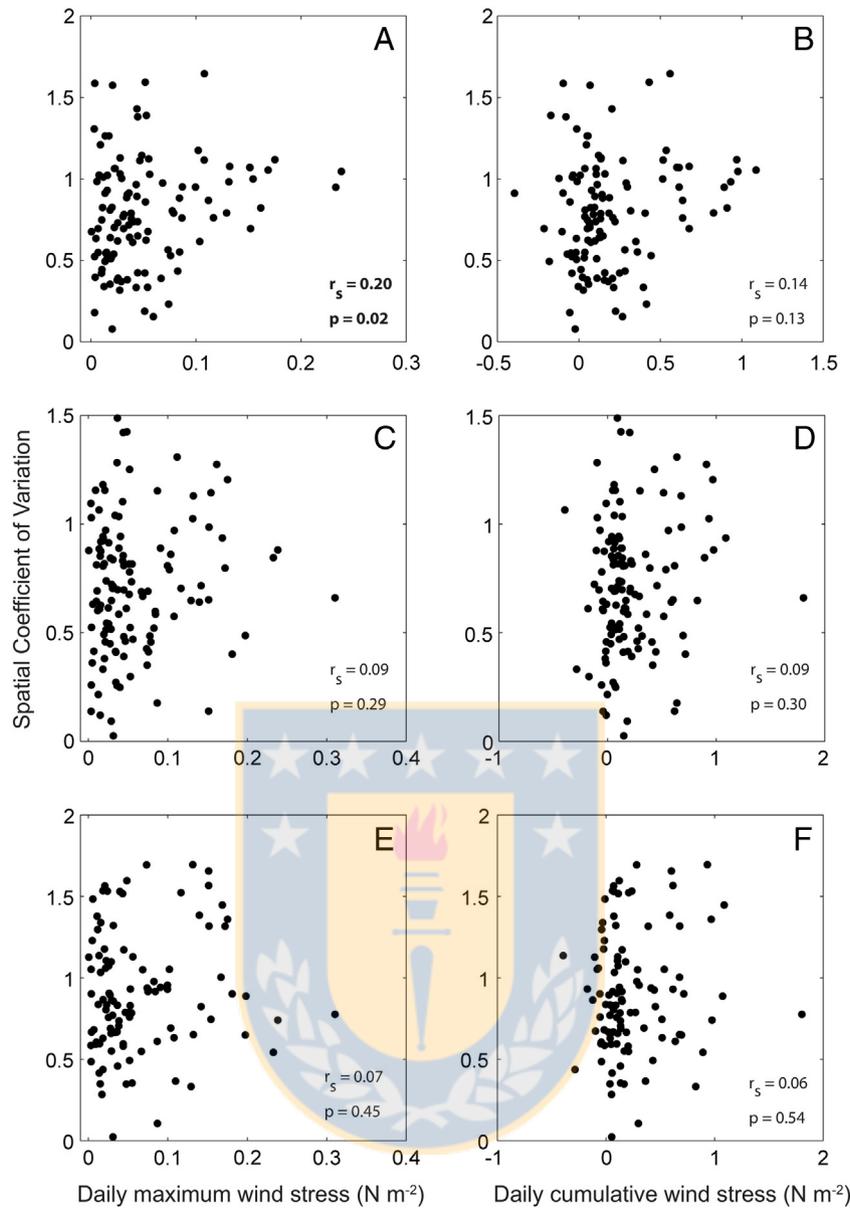


Fig. 5. Kendall correlation coefficients from among-site comparison of settlement rates under weak (circle), moderate (square), and strong (triangle) wind conditions. Filled symbols represent significant correlations with  $\alpha = 0.05$ .



**Fig. 6.** Scatterplots and Spearman's correlation coefficients computed between settlement heterogeneity and wind intensity in *J. cirratus* (A, B), *N. scabrosus* (C, D), and *N. flosculus* (E, F). Wind intensity was characterized with the daily maximum wind stress (A, C, E), and cumulative wind stress (B, D, F) calculated over the period of collector deployment. Significant correlations are shown in boldface.

scales, such as local circulation driven by diurnal winds, may not have the same effect for both species.

Settlement of the balanoid *N. flosculus* showed positive correlations between sites under all wind conditions (Fig. 5C), although its spatial pattern of settlement does not appear to respond to wind forcing (Fig. 6). This is consistent with the findings of other studies conducted over a larger region that spans Cartagena Bay (Lagos et al., 2005, 2008), where recruitment of *N. flosculus* was not related with meso-scale changes in sea surface temperature, but rather with local topography. Although the spatial pattern of settlement was not affected by changes in wind stress, the total number of larvae settling on the shoreline increased at all sites under weak wind conditions. It is possible that the hydrographic conditions within the bay during days with weak winds enhance the onshore transport of *N. flosculus* larvae. For instance, a more strongly well stratified water column, which is often observed when the wind is weak, could favor the onshore delivery of competent larvae. This could also explain the highest values of settlement rates

observed at CTGN, where the stratification is very stable even during days with strong winds (Bonicelli et al., 2014).

In this study, wind and water temperature data were analyzed to make inferences regarding the circulation within Cartagena Bay and its effect on larval transport. Although larval transport was not evaluated directly, settlement rates and their spatial variation were regarded as a sensible proxy for spatial differences in larval transport and onshore delivery. It must be noted, however, that biotic and abiotic conditions unaccounted for in this study, such as larval behavior at the time of settlement (Crisp, 1961; Crisp and Barnes, 1954; Knight-Jones and Stevenson, 1950), potential predators for cyprids in near-shore waters (Gaines and Roughgarden, 1987), and microscale hydrodynamics (Crisp, 1955) may distort or even obscure the relationship between onshore transport and larval settlement (see Rilov et al., 2008). Despite these limitations, it is concluded that daily changes in wind stress have a strong effect on the spatial pattern of diurnal fluctuations in water temperature and on the spatial pattern of barnacle settlement around the bay. It is hypothesized

that such association emerges from the effect of wind on local circulation and, by extension, on patterns of larval transport in this and other bays with similar characteristics in upwelling regions.

## Acknowledgments

We thank Fredy Veliz, Randy Finke, Manuel Castillo, Joan Escobar, Jenna Shinen, Elliott Ramos and José Pantoja who helped with the fieldwork. We especially thank Cristina Stuardo for her comments and insight on the data analysis and discussion. This research was supported by grants from the Andrew W. Mellon Foundation to SAN and from FONDECYT (grants 3070014 and 1120896) to FT. JB was supported by a MECESUP fellowship (UCO-0602) and by the COPAS Sur-Austral Program (PFB-31). [SS]

## References

- Aiken, C.M., Navarrete, S.A., 2014. Coexistence of competitors in marine metacommunities: environmental variability, edge effects, and the dispersal niche. *Ecology* 95, 2289–2302.
- Bonicelli, J., Moffat, C., Navarrete, S.A., Largier, J.L., Tapia, F.J., 2014. Spatial differences in thermal structure and variability within a small bay: interplay of diurnal winds and tides. *Cont. Shelf Res.* 1–9.
- Caro, A.U., Navarrete, S.A., Castilla, J.C., 2010. Ecological convergence in a rocky intertidal shore metacommunity despite high spatial variability in recruitment regimes. *PNAS* 107, 18528–18532.
- Connolly, S.R., Roughgarden, J., 1999. Increased recruitment of northeast Pacific barnacles during the 1997 El Niño. *Limnol. Oceanogr.* 44, 466–469.
- Crisp, D.J., 1955. The behaviour of barnacle cyprids in relation to water movement over a surface. *J. Exp. Biol.* 32, 569–590.
- Crisp, D.J., 1961. Territorial behaviour in barnacle settlement. *J. Exp. Biol.* 38, 429–446.
- Crisp, D.J., Barnes, H., 1954. The orientation and distribution of barnacles at settlement with particular reference to surface contour. *J. Anim. Ecol.* 23, 142–162.
- Cudaback, C.N., Washburn, L., Dever, E.P., 2005. Subtidal inner-shelf circulation near Point Conception, California. *J. Geophys. Res.* 110, 1–12.
- Daigle, R.M., Metaxas, A., 2011. Vertical distribution of marine invertebrate larvae in response to thermal stratification in the laboratory. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 409, 89–98.
- Daigle, R.M., Metaxas, A., 2012. Modeling of the larval response of green sea urchins to thermal stratification using a random walk approach. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 438, 14–23.
- Dellatorre, F.G., Pisoni, J.P., Barón, P.J., Rivas, A.L., 2012. Tide and wind forced nearshore dynamics in Nuevo Gulf (Northern Patagonia, Argentina): potential implications for cross-shore transport. *J. Mar. Syst.* 96–97, 82–89.
- Farrell, T.M., Bracher, D., Roughgarden, J., 1991. Cross-shelf transport causes recruitment to intertidal populations in central California. *Limnol. Oceanogr.* 36, 279–288.
- Gaines, S.D., Roughgarden, J., 1987. Fish in offshore kelp forests affect recruitment to intertidal barnacle populations. *Science* 235 (80), 479–481.
- Gaines, S.D., Gaylord, B., Largier, J.L., 2003. Avoiding current oversights in marine reserve design. *Ecol. Appl.* 13, S32–S46.
- Graham, W.M., Largier, J.L., 1997. Upwelling shadows as nearshore retention sites: the example of northern Monterey Bay. *Cont. Shelf Res.* 17, 509–532.
- Jacinto, D., Cruz, T., 2008. Tidal settlement of the intertidal barnacles *Chthamalus* spp. in SW Portugal: interaction between diel and semi-lunar cycles. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 366, 129–135.
- Kaplan, D.M., Largier, J.L., 2006. HF radar-derived origin and destination of surface waters off Bodega Bay, California. *Deep Sea Res.* II 53, 2906–2930.
- Kaplan, D.M., Largier, J.L., Navarrete, S.A., Guiñez, R., Castilla, J.C., 2003. Large diurnal temperature fluctuations in the nearshore water column. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 57, 385–398.
- Kirincich, A.R., Barth, J.A., Grantham, B.A., Menge, B.A., Lubchenco, J., 2005. Wind-driven inner-shelf circulation off central Oregon during summer. *J. Geophys. Res.* 110, 1–17.
- Knight-Jones, E.W., Stevenson, J.P., 1950. Gregariousness during settlement in the barnacle *Elminius modestus* (Darwin). *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 29, 281–297.
- Lagos, N.A., Navarrete, S.A., Véliz, F., Masuero, A., Castilla, J.C., 2005. Meso-scale spatial variation in settlement and recruitment of intertidal barnacles along the coast of central Chile. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 290, 165–178.
- Lagos, N.A., Castilla, J.C., Broitman, B.R., 2008. Spatial environmental correlates of intertidal recruitment: a test using barnacles in northern Chile. *Ecol. Monogr.* 78, 245–261.
- Large, W.G., Pond, S., 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.* 11, 324–336.
- Largier, J.L., 2003. Considerations in estimating larval dispersal distances from oceanographic data. *Ecol. Appl.* 13, 71–89.
- Lentz, S.J., Fewings, M.R., 2012. The wind- and wave-driven inner-shelf circulation. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 4, 317–343.
- Narváez, D.A., Poulin, E., Leiva, G.E., Hernández-Miranda, E., Castilla, J.C., Navarrete, S.A., 2004. Seasonal and spatial variation of nearshore hydrographic conditions in central Chile. *Cont. Shelf Res.* 24, 279–292.
- Pineda, J., 1991. Predictable upwelling and the shoreward transport of planktonic larvae by internal tidal bores. *Science* 253 (80), 548–551.
- Pineda, J., 1995. An internal tidal bore regime at nearshore stations along western U.S.A.: predictable upwelling within the lunar cycle. *Cont. Shelf Res.* 15, 1023–1041.
- Pineda, J., López, M., 2002. Temperature, stratification and barnacle larval settlement in two Californian sites. *Cont. Shelf Res.* 22, 1183–1198.
- Pineda, J., Porri, F., Starczak, V.R., Blythe, J., 2010. Causes of decoupling between larval supply and settlement and consequences for understanding recruitment and population connectivity. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 392, 9–21.
- Piñones, A., Valle-Levinson, A., Narváez, D.A., Vargas, C.A., Navarrete, S.A., Yuras, G., Castilla, J.C., 2005. Wind-induced diurnal variability in river plume motion. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 65, 513–525.
- Rilov, G., Dudas, S.E., Menge, B.A., Grantham, B.A., Lubchenco, J., Schiel, D.R., 2008. The surf zone: a semi-permeable barrier to onshore recruitment of invertebrate larvae? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 361, 59–74.
- Roughgarden, J., Gaines, S.D., Possingham, H.P., 1988. Recruitment dynamics in complex life cycles. *Science* 241 (80), 1460–1466.
- Salomon, Y., Connolly, S.R., Bode, L., 2010. Effects of asymmetric dispersal on the coexistence of competing species. *Ecol. Lett.* 13, 432–441.
- Shanks, A.L., 2009. Barnacle settlement versus recruitment as indicators of larval delivery. II. Time-series analysis and hypothesized delivery mechanisms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 385, 205–216.
- Shanks, A.L., Grantham, B.A., Carr, M.H., 2003. Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves. *Ecol. Appl.* 13, S159–S169.
- Sobarzo, M.A., Bravo, L., Moffat, C., 2010. Diurnal-period, wind-forced ocean variability on the inner shelf off Concepción, Chile. *Cont. Shelf Res.* 30, 2043–2056.
- Tapia, F.J., Navarrete, S.A., 2010. Spatial patterns of barnacle settlement in central Chile: persistence at daily to inter-annual scales relative to the spatial signature of physical variability. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 392, 151–159.
- Tapia, F.J., Pineda, J., Ocampo-Torres, F.J., Fuchs, H.L., Parnell, P.E., Montero, P., Ramos, S., 2004. High-frequency observations of wind-forced onshore transport at a coastal site in Baja California. *Cont. Shelf Res.* 24, 1573–1585.
- Vargas, C.A., Narváez, D.A., Piñones, A., Venegas, R.M., Navarrete, S.A., 2004. Internal tidal bore warm fronts and settlement of invertebrates in central Chile. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 61, 603–612.
- Wieters, E.A., Kaplan, D.M., Navarrete, S.A., Sotomayor, A., Largier, J.L., Nielsen, K.J., Véliz, F., 2003. Alongshore and temporal variability in chlorophyll a concentration in Chilean nearshore waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 249, 93–105.
- Wing, S.R., Largier, J.L., Botsford, L.W., Quinn, J.F., 1995. Settlement and transport of benthic invertebrates in an intermittent upwelling region. *Limnol. Oceanogr.* 40, 316–329.
- Woodson, C.B., Eerkes-Medrano, D.I., Flores-Morales, A., Foley, M.M., Henkel, S.K., Hessing-Lewis, M., Jacinto, D., Needles, L., Nishizaki, M.T., O'Leary, J., Ostrander, C.E., Pespeni, M., Schwager, K.B., Tyburczy, J.A., Weersing, K.A., Kirincich, A.R., Barth, J.A., Mcmanus, M.A., Washburn, L., 2007. Local diurnal upwelling driven by sea breezes in northern Monterey Bay. *Cont. Shelf Res.* 27, 2289–2302.

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio revelan un contraste en la variabilidad de la temperatura y la estratificación térmica entre los extremos norte y sur de la bahía de Cartagena, lo cual es modulado principalmente por el efecto combinado del viento y la topografía local, y tiene un efecto importante sobre el transporte de larvas de cirripedios a los ambientes intermareales y consecuentemente sobre la heterogeneidad espacial del asentamiento. Estudios oceanográficos realizados con anterioridad en la bahía de Cartagena se habían enfocado sólo en su extremo norte, demostrando que las fluctuaciones diurnas de temperatura en aguas de plataforma interior son comparables con los rangos estacionales de temperatura para esta zona, y atribuyendo este calentamiento a un efecto combinado de la brisa marina y calentamiento solar (Kaplan *et al.* 2003).

La señal térmica diurna detectada en el presente estudio es muy similar a la observada previamente por Kaplan *et al.* (2003) para el extremo norte de la bahía (ECIM), lo cual confirma que forzantes físicos diurnos pueden modular la temperatura del agua en la superficie y hasta una profundidad de al menos 20 metros. A diferencia del estudio de Kaplan *et al.* (2003), que compara las fluctuaciones diurnas de temperatura entre lugares separados por cientos de kilómetros, las mediciones realizadas para este trabajo permitieron comparar la estructura térmica de la columna de agua y su variabilidad diurna entre los extremos de la bahía de Cartagena, separados por 6 km de distancia. El trabajo de Kaplan *et al.* (2003) muestra diferencias sustanciales entre localidades y explica que esta diferencia se debe en parte a los cambios espaciales en la intensidad de la brisa marina. En este estudio, las localidades que se comparan están distanciadas por solo 6 km de distancia, por ello se espera que los patrones diurnos de la radiación solar y del viento sean los mismos entre ambas localidades. Sin embargo, los resultados muestran que las fluctuaciones diurnas de temperatura del agua (i.e. periodo de 24 h) difieren sustancialmente entre ambos extremos de la bahía.

Aunque para una costa recta y con orientación norte-sur no se debería observar cambios espaciales en las condiciones hidrográficas sobre distancias tan cortas, la topografía

de la bahía de Cartagena da lugar a que se generen estas diferencias espaciales en la temperatura del agua. En el extremo sur (CTGN), y protegido del viento, la señal diurna es mucho más débil que en el extremo norte (ECIM) que está expuesto al viento. Además, la estratificación térmica en el extremo sur es persistente durante todo el día, ya que está protegido de la brisa marina que se manifiesta en esta zona durante la tarde (Kaplan *et al.* 2003, Narváez *et al.* 2004, Piñones *et al.* 2005). Es posible que esta diferencia espacial en la estructura térmica se deba a un efecto combinado de la topografía de la bahía y procesos físicos que ocurren a diferentes escalas de variabilidad, tales como la circulación asociada a la surgencia costera y el transporte de agua cálida hacia la costa mediado por la brisa marina. Como ha sido demostrado en otras bahías localizadas en regiones de surgencia, el efecto combinado de la topografía y los vientos favorables a la surgencia costera generan una circulación local que es muy diferente a la que se observa en zonas expuestas (Rosenfeld *et al.* 1994, Graham & Largier 1997, Penven *et al.* 2000, Roughan *et al.* 2005a, Valle-Levinson & Moraga-Opazo 2006).

En estas bahías el flujo asociado a la surgencia se separa de la línea de costa y genera una circulación ciclónica en el área más protegida del viento, luego se desvía y converge con la costa y forma una circulación anticiclónica en la zona más expuesta (Graham & Largier 1997, Penven *et al.* 2000, Valle-Levinson & Moraga-Opazo 2006). En otras bahías localizadas en la costa de Chile, que presentan dimensiones y características similares a la bahía de Cartagena, también se ha observado este patrón de circulación. Por ejemplo, en la bahía de Guanaqueros que presenta una extensión de 10 km se ha observado una circulación ciclónica en el extremo sur y más protegido del viento y otra anticiclónica en el extremo norte y más expuesto al viento (Valle-Levinson & Moraga-Opazo 2006). Esta circulación de frecuencia relativamente más baja, parece manifestarse en la bahía de Cartagena y modular la estructura espacial de la variabilidad en temperatura. Es posible que el flujo costero producido por el viento favorable a la surgencia entre a la bahía y por un efecto de vorticidad se produzca una circulación ciclónica que retiene agua en su extremo sur. Por otro lado, el viento que a escala de la región favorece la surgencia costera, a escala de la bahía de Cartagena es perpendicular a la costa en su extremo norte (sitio ECIM), por lo que promovería el transporte de agua cálida en superficie hacia la costa en horas de la tarde, cuando la brisa sopla hacia el continente

(Kaplan *et al.* 2003, Dellatorre *et al.* 2012). En horas de la noche y madrugada, cuando este viento perpendicular a la costa se debilita e incluso cambia de dirección, el transporte de agua cálida se detiene y la temperatura del agua disminuye. Por ello, mientras que en el extremo de la bahía más protegida del viento la señal diurna es débil en la superficie (9% de la varianza total) y la columna de agua se mantiene estratificada durante todo el día y la noche, en el extremo norte la señal diurna es fuerte tanto en la superficie (38% de la varianza total) como en el fondo (27% de la varianza total) y se observan grandes cambios entre un dominio de agua fría en la mañana y una acumulación de agua cálida durante la tarde.

Debido a que la localidad de CTGN está protegida de la acción directa de la brisa marina, la señal semi-diurna predominó en toda la columna de agua. Este patrón no se observó en el extremo norte de la bahía, donde la variabilidad semi-diurna fue importante sólo en las capas más profundas, por debajo de los 10 metros de profundidad (Kaplan *et al.* 2003). A pesar de que los resultados muestran una señal semi-diurna muy clara en las capas de fondo de ECIM y en toda la columna de agua de CTGN, y una clara relación con la variabilidad semi-diurna en el nivel del mar, no es posible determinar si estas fluctuaciones se deben a flujos de marea barotrópicos o a la propagación de ondas internas hacia la costa.

El análisis de las corrientes registradas en el extremo norte de la bahía mediante funciones ortogonales empíricas (EOF) reveló una estructura de dos capas en el modo dominante de variabilidad en la componente perpendicular a la costa. Dicha estructura se asoció principalmente al viento diurno, según se pudo establecer a partir de la marcada periodicidad diurna detectada en el modo temporal correspondiente, la cual está en fase con el viento diurno. Además, en días con viento fuerte el flujo superficial en el eje perpendicular a la costa tiene la misma dirección del viento (hacia la costa), mientras que el flujo cercano al fondo va en sentido opuesto. Estas observaciones revelan que al menos en el extremo norte de la bahía existe un mecanismo de transporte hacia la costa mediado por el viento diurno. Lamentablemente en este estudio no se registraron datos de corrientes en el extremo sur de la bahía, sin embargo se espera que dicho mecanismo no se manifieste en el extremo sur, dado lo protegido que está del viento y por el hecho que las fluctuaciones en temperatura no tuvieron relación con el viento diurno. Este flujo de dos capas con periodicidad diurna en el extremo

norte, y que se intensifica en días con viento fuerte, puede tener grandes implicancias para entender el transporte de larvas de invertebrados hacia ambientes intermareales, dado el limitado conjunto de mecanismos físicos hasta ahora descritos (Lentz *et al.* 2008, Fewings *et al.* 2008, Sobarzo *et al.* 2010, Lentz & Fewings 2012) como capaces de transportar agua, calor y material en suspensión, incluyendo larvas planctónicas, en el sentido perpendicular a la línea de costa en la plataforma interior.

En este estudio se estableció que la Bahía de Cartagena presenta características hidrográficas típicas de las llamadas "sombras de surgencia" (Graham 1993, Graham & Largier 1997), que corresponden a áreas protegidas del viento favorable a la surgencia y de la circulación costera típicamente asociada a la condición de surgencia activa. Así como se observa en la bahía de Monterey (Graham & Largier 1997) en California, en la bahía de Cartagena persiste una capa superficial cálida en la zona más protegida del viento que se mantiene durante todo el día independientemente de las condiciones de la brisa marina. Esta capa sólo se disipa brevemente cuando el viento es fuerte ( $> 10$  m/s durante la tarde) por varios días consecutivos (por ejemplo el 21-23 Diciembre 2011), pero no por el efecto directo del viento, sino más bien por la intrusión de agua fría desde el fondo (18-22 Diciembre 2011) que finalmente, después de días, rompe la estratificación térmica en el extremo sur.

En concreto, se observaron condiciones contrastantes de estratificación térmica y variabilidad diurna en la temperatura entre extremos de la bahía, lo cual se infiere resulta del efecto combinado de la circulación de baja frecuencia asociada a la surgencia, y el transporte de agua cálida hacia la costa mediado por la brisa marina, ambos interactuando con la topografía de la bahía. Dado lo anterior, el gradiente espacial de las condiciones hidrográficas debería potenciarse en días con viento intenso, como resultado de un cambio en la circulación al interior de la bahía. Esto debiese generar diferencias espaciales en el transporte larval e inducir cambios en el patrón espacial del asentamiento. En relación a esto último, numerosos estudios llevados a cabo durante las últimas décadas se han enfocado en identificar los procesos físicos que tienen mayor influencia en el transporte de larvas hacia los ambientes intermareales, en el patrón espacial de asentamiento larval y posterior reclutamiento (e.g. Roughgarden *et al.* 1988, Farrell *et al.* 1991, Connolly & Roughgarden 1999, Lagos *et al.*

2005, 2008). Esta es una pregunta de importancia ecológica que tiene implicancias para el manejo y diseño de áreas marinas protegidas y reservas marinas (Gaines *et al.* 2003, Largier 2003, Shanks *et al.* 2003).

Este estudio reveló diferencias sustanciales en la variabilidad diurna de la temperatura entre extremos de la bahía, las cuales se acentúan durante días con viento fuerte. Mientras que en el extremo norte la señal diurna de la temperatura permanece muy clara, en el sur esta señal fue muy débil durante esta condición de viento. Esta mayor heterogeneidad espacial de la estructura térmica dentro de la bahía durante días con viento fuerte puede resultar de una surgencia fuerte que favorece la retención de agua superficial en el extremo sur y más protegido del viento (Graham & Largier 1997, Roughan *et al.* 2005b), y de una brisa marina más intensa que favorece el transporte de agua cálida hacia el extremo más expuesto de la bahía durante la tarde (Kaplan *et al.* 2003, Tapia *et al.* 2004, Piñones *et al.* 2005).

La débil señal diurna de la temperatura del agua, que se observó en el sitio CTGN durante días con viento fuerte, sugiere que esta condición de viento puede generar una columna de agua más estable y estratificada en el extremo más protegido. Por otro lado, la señal diurna más clara que se observó en el lado expuesto al viento, refleja una advección más intensa y una columna de agua menos estratificada. Estos posibles cambios espaciales en la estratificación térmica podrían afectar la distribución vertical de larvas en la columna de agua (Daigle & Metaxas 2011, 2012) y, por lo tanto, afectar su transporte y su posterior llegada al hábitat intermareal.

Estudios realizados por Pineda (1991, 1995) demostraron que las ondas internas son más frecuentes en sitios con mayor estratificación, y que localidades que difieren en la incidencia de ondas internas presentan grandes diferencias en el asentamiento larval (Pineda & López 2002). Esto podría estar ocurriendo en la bahía de Cartagena. En el sitio ECIM del extremo norte, el viento fuerte de la tarde que rompe la estratificación térmica de la columna de agua afecta negativamente el asentamiento de *J. cirratus*. Por otro lado, en el sitio CTGN del extremo sur de la bahía, donde la estratificación térmica es persistente independientemente de la intensidad del viento, el asentamiento se mantiene muy similar entre las distintas

condiciones de viento. De esta forma, el posible contraste en la estratificación térmica de la columna de agua entre extremos de la bahía durante días con viento fuerte podría estar generando condiciones contrastantes en términos de la ocurrencia de fenómenos físicos que intervienen en el transporte de larvas hacia la costa, y que pueden alterar el tiempo de llegada de larvas al hábitat intermareal (Pineda *et al.* 2010). Esto podría explicar la falta de sincronía en el asentamiento de *J. cirratus* entre los extremos de la bahía durante días con viento fuerte, y la correlación positiva y significativa ( $r_s = 0.2$ ,  $p = 0.02$ ) entre el patrón espacial del asentamiento y el máximo diario del stress de viento.

Es importante mencionar que el coeficiente de variación espacial en el asentamiento de *J. cirratus* se correlacionó significativamente con el máximo diario del stress de viento ( $r_s = 0.2$ ,  $p = 0.02$ ) y no con el stress de viento acumulado ( $r_s = 0.14$ ,  $p = 0.13$ ). Esta discrepancia podría deberse a que el valor máximo diario de stress de viento es un indicador más directo de la intensidad de la brisa marina que se desarrolla en la tarde, mientras que el stress de viento acumulado integra la variabilidad del viento durante todo un ciclo de 24 horas, incluyendo el viento débil de la madrugada y de la mañana. Por lo tanto, el cálculo del stress acumulado puede opacar la intensidad de la brisa, la cual es un forzante importante de la circulación en esta bahía (Kaplan *et al.* 2003, Piñones *et al.* 2005).

Los resultados demuestran que, al menos para la especie de chthamálido *J. cirratus*, los flujos impulsados por el viento diurno y su interacción con la topografía de la bahía pueden modular el transporte de larvas hacia ambientes intermareales y el patrón espacial del asentamiento. Sin embargo, el patrón espacial de asentamiento del otro cirripedio chthamalido *N. scabrosus* no respondió de la misma manera al forzamiento del viento. En estudios previos realizados en la región que abarca la bahía de Cartagena (Lagos *et al.* 2005, 2007) se ha demostrado para ambas especies de chthamalidos (*J. cirratus* y *N. scabrosus*) que el patrón de meso-escala en el reclutamiento, i.e. observaciones quincenales mediante colectores de asentamiento, se asemeja a la variabilidad espacial de la temperatura inducida por surgencia costera. Por otro lado Lagos *et al.* (2008) evaluó el efecto de un gran número de procesos hidrográficos e hidrodinámicos de diferentes escalas espacio-temporales sobre el reclutamiento de ambos chthamalidos en un área de 250 km de distancia en la costa norte de

Chile. Ellos demostraron que tanto procesos de meso-escala (e.g. surgencia costera) como procesos locales (e.g. formación de slicks) tienen un gran efecto sobre la estructura espacial del reclutamiento de ambos chthamalidos en esta región. Aquí se establece que a una menor escala espacial, y al observar el asentamiento con una frecuencia diaria, la variabilidad diurna en el stress de viento parece influenciar el patrón espacial de asentamiento de *J. cirratus* pero no el de *N. scabrosus*. Con base en estos resultados y aquellos obtenidos por Lagos *et al.* (2005, 2008), se podría concluir que dentro de una escala regional el patrón espacial de asentamiento de ambos cirripedios está modulado por procesos físicos de meso-escala, y procesos locales, pero a una escala espacial más pequeña los procesos de mayor frecuencia, tal como la circulación local de la bahía impulsada por el viento diurno, tienen un efecto muy diferente sobre el patrón espacial del asentamiento entre ambos chthamalidos.

El asentamiento del balanido *N. flosculus* mostró una correlación positiva entre los sitios bajo todas las condiciones de viento, además su patrón espacial no reveló ninguna correlación con el stress de viento. Esto es consistente con los hallazgos de otro estudio realizado en esta misma región (Lagos *et al.* 2005), donde el reclutamiento de *N. flosculus* no tuvo ninguna relación con la variabilidad espacial de meso-escala de la temperatura pero sí con la topografía local. Aunque el patrón espacial de asentamiento de *N. flosculus* no se vio afectado por cambios en el stress de viento, en todos los sitios las mayores tasas de asentamiento se observaron bajo condiciones de viento débil. Es posible que las condiciones hidrográficas que se generan dentro de la bahía durante días con viento débil sean favorables para el transporte de larvas de esta especie hacia la costa. Por ejemplo, una columna de agua más estratificada, que es comúnmente observada cuando el viento es débil, puede favorecer la llegada al intermareal de larvas con mayores capacidades natatorias y/o que responden a procesos hidrodinámicos de alta frecuencia como ondas internas que se propagan hacia la costa (Pineda 1991, Helfrich & Pineda 2003, Scotti & Pineda 2007). Esto también podría explicar las altas tasas de asentamiento de *N. flosculus* encontradas en forma consistente en el sitio CTGN al extremo sur de la bahía, donde la estratificación térmica es persistente incluso durante días con viento fuerte.

En general, el efecto que tenga un proceso físico sobre la estructura espacial de una especie va depender de la escala espacial y temporal de dicho proceso. Por ejemplo, un estudio realizado por Navarrete *et al.* (2008) que evalúa y compara la sincronía espacial del reclutamiento de diversas especies de invertebrados bentónicos costeros entre el hemisferio norte y el hemisferio sur, indica que la sincronía espacial en el reclutamiento ocurre dentro de una escala de 200 km en ambos hemisferios y sugieren que esta sincronía espacial está modulada por un proceso físico de meso-escala como la surgencia costera. En este estudio, donde se evalúa el asentamiento diario de cirripedios dentro de una escala espacial de 6 km se muestra que el asentamiento puede ser altamente sincrónico cuando el viento es débil pero si este se intensifica la sincronía disminuye, al menos para la especie *J. cirratus*.

A pesar de que el transporte de larvas no se evaluó directamente, las tasas de asentamiento y su variación espacial son consideradas como indicadores para establecer diferencias espaciales en el transporte larval y su llegada al hábitat intermareal. Sin embargo, cabe señalar que otras condiciones abióticas y bióticas que pueden distorsionar la relación entre transporte y asentamiento larval, tales como el comportamiento larval durante el asentamiento (Knight-Jones & Stevenson 1950, Crisp & Barnes 1954, Crisp 1961), la hidrodinámica de micro-escala a la cual están sometidas las larvas antes de asentarse (Crisp 1955), la presencia de depredadores (Gaines & Roughgarden 1987), falta de sustrato adecuado (Manríquez *et al.* 2004) y condiciones físicas o biológicas que desfavorecen la sobrevivencia post-asentamiento (Stotz *et al.* 1991, Pineda 1994) no han sido consideradas en este estudio. Además, es necesario enfatizar que es siempre posible observar condiciones hidrodinámicas que en efecto favorecen el transporte larval, pero que no siempre se reflejen en asentamiento debido a que las larvas competentes no siempre están presentes en el plancton (Pineda 2000). Por ello, aunque el estudio de patrones espacio-temporales de asentamiento permite hacer inferencia y plantear hipótesis respecto a mecanismos físicos que podrían estar mediándolo, el monitoreo conjunto de asentamiento y condiciones físicas pero sin información concurrente sobre la presencia y abundancia de larvas en el plancton puede no entregar respuestas del todo concluyentes. A pesar de estas limitaciones, se concluye que los cambios diarios en el stress de viento tienen un fuerte y consistente efecto sobre la circulación y estructura hidrográfica en la bahía, reflejadas en el patrón observado de fluctuaciones diurnas en la temperatura del agua,

y sobre el patrón espacial del asentamiento de cirripedios en la bahía de Cartagena. Estos resultados sugieren que dicha asociación surge del efecto del viento sobre la circulación local y, por extensión, sobre los mecanismos de transporte de larvas en esta y otras bahías con características similares que se encuentran en regiones de surgencia.



## 6. CONCLUSIONES

1. Las condiciones hidrográficas y dinámicas dentro de la bahía de Cartagena responden a una combinación de procesos que ocurren a diferentes escalas de variabilidad, tales como la circulación forzada por el viento favorable a la surgencia y el transporte de agua cálida hacia la costa forzado por la brisa marina. Mientras que el flujo de surgencia que se transporta directo hacia el norte de la bahía genera una mayor retención de agua cálida superficial y una columna de agua más estratificada en la zona más protegida del viento, en el norte se observan cambios entre agua fría de surgencia en la mañana y agua cálida transportada hacia la costa por la brisa marina durante la tarde. Eso sugiere que en el extremo sur el material superficial puede estar más retenido que en el extremo norte donde el material de la capa superficial puede intercambiarse regularmente entre aguas más oceánicas y aguas más costeras por efecto de la brisa marina.

2. Un aumento en la intensidad del viento genera una mayor heterogeneidad espacial en la variabilidad diurna de la temperatura dentro de la bahía de Cartagena. Durante días con viento fuerte se observó una diferencia significativa en la amplitud de la señal diurna de temperatura entre extremos de la bahía. El día solar promedio de temperatura durante días con viento fuerte, reveló una señal diurna fuerte en el extremo norte y débil en el extremo sur. Estas diferencias espaciales en la variabilidad diurna de la temperatura sugieren una diferencia espacial en los mecanismos de transporte de agua y material vivo o inerte hacia la costa, incluyendo larvas de especies de invertebrados costeros.

3. Cambios en la intensidad del viento a escala diaria producen cambios en el patrón espacial del asentamiento sólo para la especie *J. cirratus*, mas no para el otro chthamalido *N. scabrosus* o para el balanido *N. flosculus*. Un aumento en la intensidad del viento aumenta la heterogeneidad espacial del asentamiento de *J. cirratus* en la bahía de Cartagena. Se sugiere que dicha asociación surge del efecto del viento sobre la circulación local y, por extensión, sobre los mecanismos involucrados en el transporte de larvas y su posterior arribo al ambiente intermareal.

## 7. REFERENCIAS

- Abbs DJ, Physick WL. 1992. Sea-breeze observation and modeling: a review. *Aust Meg Mat* 41: 7 - 19.
- Aguiar-González B, Rodríguez-Santana A, Cisneros-Aguirre J, Martínez-Marrero A. 2011. Diurnal–inertial motions and diapycnal mixing on the Portuguese shelf. *Cont Shelf Res* 31: 1193–1201
- Austin JA, Lentz SJ. 2002. The inner shelf response to wind-driven upwelling and downwelling. *J Phys Oceanog* 32: 2171 - 2193.
- Barshis DJ, Sotka EE, Kelly RP, Sivasundar A, Menge BA, Barth JA, Palumbi SR.. 2011. Coastal upwelling is linked to temporal genetic variability in the acorn barnacle *Balanus glandula*. *Mar Ecol Prog Ser* 439: 139–150.
- Brink KH. 1983. The near-surface dynamics of coastal upwelling. *Prog Oceanogr* 12: 223 - 257.
- Broitman BR, Blanchette CA, Gaines SD. 2005. Recruitment of intertidal invertebrates and oceanographic variability at Santa Cruz Island, California. *Limnol Oceanogr* 50: 1473 - 1479.
- Castilla JC, Lagos NA, Guiñez R, Largier JL. 2002. Embayments and nearshore retention of plankton: the Antofagasta Bay and other examples. En: *The Oceanography and Ecology of the Nearshore and Bays in Chile*, J. C. Castilla and J. L. Largier (editores), Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, 179-203.
- Castelao RM, Barth JA. 2006. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophys Res Lett* 33, L03602, doi:10.1029/2005GL025182
- Connolly SR, Roughgarden J. 1999. Increased recruitment of northeast Pacific barnacles during the 1997 El Niño. *Limnol Oceanogr* 44: 466 - 469.
- Connolly S, Menge B, Roughgarden J. 2001. A latitudinal gradient in recruitment of intertidal invertebrates in the northeast Pacific Ocean. *Ecology* 82: 1799 – 1813.
- Crisp DJ. 1955. The behaviour of barnacle cyprids in relation to water movement over a surface. *J Exp Biol* 32: 569 - 590.
- Crisp DJ. 1961. Territorial behaviour in barnacle settlement. *J Exp Biol* 38: 429 - 446.
- Crisp DJ, Barnes H. 1954. The orientation and distribution of barnacles at settlement with particular reference to surface contour. *J Anim Ecol* 23: 142 - 162.

- Cudaback CN, Washburn L, Dever E. 2005. Subtidal inner-shelf circulation near Point Conception, California. *J Geophys Res* 110, C10007, doi:10.1029/2004JC002608.
- Daigle RM, Metaxas A. 2011. Vertical distribution of marine invertebrate larvae in response to thermal stratification in the laboratory. *J Exp Mar Biol Ecol* 409: 89 - 98.
- Daigle RM, Metaxas A. 2012. Modeling of the larval response of green sea urchins to thermal stratification using a random walk approach. *J Exp Mar Biol Ecol* 438: 14 - 23.
- Dellatorre FG, Pisoni JP, Barón PJ, Rivas AL. 2012. Tide and wind forced nearshore dynamics in Nuevo Gulf (Northern Patagonia, Argentina): Potential implications for cross-shore transport. *J Mar Syst* 96 – 97: 82 - 89.
- Emery WJ, Thomson RE. 2001. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier, Amsterdam.
- Farrell TM, Bracher D, Roughgarden J. 1991. Cross-shelf transport causes recruitment to intertidal populations in central California. *Limnol. Oceanogr.* 36(2), 279 - 288.
- Fewings M, Lentz SJ, Fredericks J. 2008. Observations of cross-shelf flow driven by cross-shelf winds on the inner continental shelf. *J Phys Oceanog* 38: 2358 - 2378.
- Figueroa D, Moffat C. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophys Res Lett* 27 (23): 3905 - 3908.
- Filonov A, Lavín MF, Ladah LB, Tereshchenko I. 2014. Spatial variability of internal waves in an open bay with a narrow steep shelf in the Pacific off NW Mexico. *Cont Shelf Res* 78: 1 – 15.
- Gaines SD, Gaylord B, Largier JL. 2003. Avoiding current oversights in marine reserve design. *Ecol Appl* 13(1): 32 - 46.
- Gaines SD, Roughgarden J. 1987. Fish in offshore kelp forest affect recruitment to intertidal barnacle populations. *Science* 235: 479 - 481.
- Gille ST, Llewellyn Smith SG, Lee SM. 2003. Measuring the sea breeze from QuikSCAT Scatterometry. *Geophys Res Lett* 30, NO. 3, 1114, doi:10.1029/2002GL016230.
- Graham WM, Field JG, Potts DC. 1992. Persistent "upwelling shadows" and their influence on zooplankton distributions. *Mar Biol* 114: 561 - 570.
- Graham WM. 1993. Spatio-temporal scale assessment of an "upwelling shadow" in northern Monterey Bay, California. *Estuaries* 16 (1): 83 - 91.
- Graham WM, Largier JL. 1997. Upwelling shadows as nearshore retention sites: the example of northern Monterey Bay. *Cont Shelf Res* 17: 509 - 532.

- Helfrich KR, Pineda J. 2003. Accumulation of particles in propagating fronts. *Limnol Oceanogr* 48(4): 1509 – 1520.
- Hendrickson J, MacMahan J. 2009. Diurnal sea breeze effects on inner-shelf cross-shore exchange. *Cont Shelf Res* doi:10.1016/j.csr.2009.08.011.
- Hill AE. 1998. Diel vertical migration in stratified tidal flows: Implications for plankton dispersal. *J Mar Res* 56: 1069 - 1096.
- Hoffmann V, Pfaff MC, Branch GM. 2012. Spatio-temporal patterns of larval supply and settlement of intertidal invertebrates reflect a combination of passive transport and larval behavior. *J Exp Mar Biol Ecol* 418 – 419: 83 – 90.
- Hyder P, Simpson JH, Christopoulos S. 2002. Sea-breeze forced diurnal surface currents in the Thermaikos Gulf, North-west Aegean. *Cont Shelf Res* 22: 585 - 601.
- Jacinto D, Cruz T. 2008. Tidal settlement of the intertidal barnacles *Chthamalus* spp. in SW Portugal: interaction between diel and semi-lunar cycles. *Mar Ecol Prog Ser* 366: 129 - 135.
- Kaplan DM, Largier JL, Navarrete SA, Guiñez R, Castilla JC. 2003. Large diurnal temperature fluctuations in the nearshore water column. *Estuar Coast Shelf Sci* 57: 385 - 398.
- Kirincich AK, Barth JA, Grantham BA, Menge BA, Lubchenco J. 2005. Wind-driven inner-shelf circulation off central Oregon during summer. *J Geophys Res* 110, doi:10.1029/2004JC002611.
- Knight-Jones EW, Stevenson JP. 1950. Gregariousness during settlement in the barnacle *Elminius modestus* Darwin. *J Mar Biol Assoc U K* 29: 281 - 297.
- Ladah LB, Tapia FJ, Pineda J, López M. 2005. Spatially heterogeneous, synchronous settlement of *Chthamalus* spp. larvae in northern Baja California. *Mar Ecol Prog Ser* 302: 177 - 185.
- Lagos NA, Tapia FJ, Navarrete SA, Castilla JC. 2007. Spatial synchrony in the recruitment of intertidal invertebrates along the coast of central Chile. *Mar Ecol Prog Ser* 350: 29 - 39.
- Lagos NA, Castilla JC, Broitman BR. 2008. Spatial environmental correlates of intertidal recruitment: A test using barnacles in northern Chile. *Ecol Monogr* 78: 245 - 261.
- Lagos NA, Navarrete SA, Véliz F, Masuero A, Castilla JC. 2005. Meso-scale spatial variation in settlement and recruitment of intertidal barnacles along the coast of central Chile. *Mar Ecol Prog Ser* 290: 165 - 178.
- Large WG, Pond S. 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J Phys Oceanogr* 11: 324 - 336.

- Largier J. 2003. Considerations in estimating larval dispersal distances from oceanographic data. *Ecol Appl* 13: S71–S89.
- Lentz SJ. 1995. Sensitivity of the inner-shelf circulation to the form of the eddy-viscosity profile. *J Phys Oceanogr* 25: 19 - 28.
- Lentz SJ. 2001. The influence of stratification on the wind-driven cross-shelf circulation over the North Carolina shelf. *J Phys Oceanogr* 31: 2749 -2760.
- Lentz SJ, Fewings M, Howd P, Fredericks J, Hathaway K. 2008. Observations and a Model of Undertow over the Inner Continental Shelf. *J Phys Oceanogr* 38: 2341 – 2357.
- Lentz SJ, Fewings MR. 2012. The wind- and wave-driven inner-shelf circulation. *Annu Rev Mar Sci* 4: 317 - 343.
- Lerczak JA, Hendershott MC, Winant CD. 2001. Observations and modeling of coastal internal waves driven by a diurnal sea breeze. *J Geophys Res* 106: 19715-19729.
- Letelier J, Pizarro O, Nuñez S. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *J. Geophys. Res.* 114, C12009, doi:10.1029/2008JC005171.
- Manríquez PH, Navarrete SA, Rosson A, Castilla JC. 2004. Settlement of the gastropod *Concholepas concholepas* on shells of conspecific adults. *J Mar Biol Ass U K* 84: 651 - 658.
- Masselink G, Pattiaratchi CB. 1998. The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment resuspension. *Mar Geol* 146: 115 - 135.
- Monteiro PMS, Largier JL. 1999. Thermal Stratification in Saldanha Bay (South Africa) and Subtidal, Density-driven Exchange with the Coastal Waters of the Benguela Upwelling System. *Estuar Coast Shelf Sci* 49: 877 – 890.
- Morgan SG. 1995. Life and death in the plankton: Larval mortality and adaptation. *Ecology of Marine Invertebrate Larvae*. L. McEdward. Boca Raton, FL, CRC PRESS: 279 - 321.
- Morgan SG, Fisher JL, Mace AJ, Akins L, Slaughter AM, Bollens SM. 2009. Cross-shelf distributions and recruitment of crab postlarvae in a region of strong upwelling. *Mar Ecol Prog Ser* 380: 173 - 185.
- Morgan SG, Fisher JL, McAfee ST, Largier JL, Halle CM. 2012. Limited recruitment during relaxation events: Larval advection and behavior in an upwelling system. *Limnol Oceanogr* 57(2): 457- 470.

- Narváez DA, Poulin E, Leiva G, Hernández E, Castilla JC, Navarrete SA. 2004. Seasonal and spatial variation of nearshore hydrographic conditions in central Chile. *Cont Shelf Res* 24: 279 - 292.
- Navarrete SA, Castilla JC. 1990. Barnacle walls as mediators of intertidal mussel recruitment: effects of patch size on the utilization of space. *Mar Ecol Prog Ser* 68: 113 - 119.
- Navarrete SA, Broitman BR, Menge BA. 2008. Interhemispheric comparison of recruitment to intertidal communities: pattern persistence and scales of variation. *Ecology* 89(5): 1308 – 1322.
- Nielsen KJ, Navarrete SA. 2004. Mesoscale regulation comes from the bottom-up: Intertidal interactions between consumers and upwelling. *Ecol Lett* 7: 31 - 41.
- Pattiaratchi C, Hegge B, Gould J, Eliot I. 1997. Impact of sea breeze activity on nearshore and foreshore processes in southwestern Australia. *Cont Shelf Res* 13: 1539 - 1560.
- Parada CE, Sobarzo MA, Figueroa D, Castro L. 2001. Circulación del Golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Invest. Mar., Valparaíso* 29(1): 11 – 23.
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Comput Geosci* 28: 929 - 937.
- Penven P, Roy C, Colin de Verdière A, Largier J. 2000. Simulation of a coastal jet retention process using a barotropic model. *Oceanol Acta* 23: 615 – 634.
- Pfeiffer-Herbert AS, McManus MA, Raimondi PT, Chao Y, Chai F. 2007. Dispersal of barnacle larvae along the central California coast: A modeling study. *Limnol Oceanogr* 52: 1559-1569.
- Pineda J. 1994. Spatial and temporal patterns in barnacle settlement rate along a southern California rocky shore. *Mar Ecol Prog Ser* 107: 125 - 138.
- Pineda J. 1991. Predictable upwelling and the shoreward transport of the planktonic larvae by internal tidal bores. *Science* 253: 548 - 551.
- Pineda J. 1995. An internal tidal bore regime at nearshore stations along western U.S.A.: predictable upwelling within the lunar cycle. *Cont Shelf Res* 15: 1023 - 1041.
- Pineda J. 2000. Linking larval settlement to larval transport: assumptions, potentials, and pitfalls. *Oceanogr East Pac* 1: 84 - 105.
- Pineda J, López M. 2002. Temperature, stratification and barnacle larval settlement in two Californian sites. *Cont Shelf Res* 22: 1183–1198.

- Pineda J, Porri F, Starczak V, Blythe J. 2010. Causes of decoupling between larval supply and settlement and consequences for understanding recruitment and population connectivity. *J Exp Mar Biol Ecol* 392: 9 - 21.
- Piñones A, Valle-Levinson A, Narváez DA, Vargas CA, Navarrete SA, Yuras G, Castilla JC. 2005. Wind-induced diurnal variability in river plume motion. *Estuar Coast Shelf S* 65: 513 - 525.
- Porri F, McQuaid CD, Radloff S. 2006. Spatio-temporal variability of larval abundance and settlement of *Perna perna*: differential delivery of mussels. *Mar Ecol Prog Ser* 315: 141 - 150.
- Poulin E, Palma AT, Leiva G, Narváez D, Pacheco R, Navarrete SA, Castilla JC. 2002. Avoiding offshore transport of competent larvae during upwelling events: The case of the gastropod *Concholepas concholepas* in Central Chile. *Limnol Oceanogr* 47: 1248–1255.
- Pulliam HR. 1988. Sources, sinks and population regulation. *The American Naturalist* 132(5): 652 – 661.
- Queiroga H, Blanton J. 2005. Interactions Between Behaviour and Physical Forcing in the Control of Horizontal Transport of Decapod Crustacean Larvae. *Adv Mar Biol* 47: 107 - 214.
- Rippeth TP, Simpson JH, Player RJ, García M. 2002. Current oscillations in the diurnal-inertial band on the Catalonia shelf in spring. *Cont Shelf Res* 22: 247 -265.
- Rosenfeld LK. 1988. Diurnal period wind stress and current fluctuations over the continental shelf off Northern California. *J Geophys Res* 93: 2257 - 2276.
- Rosenfeld LK, Schwing FB, Garfield N, Tracy DE. 1994. Bifurcated flow from an upwelling center: a cold water source for Monterey Bay. *Cont Shelf Res.* 14: 931 - 964.
- Roughan M, Terrill EJ, Largier JL, Otero MP. 2005a. Observations of divergence and upwelling around Point Loma, California. *J Geophys Res* 110, C04011, doi:10.1029/2004JC002662.
- Roughan M, Mace AJ, Largier JL, Morgan SG, Fisher JL, Carter ML. 2005b. Subsurface recirculation and larval retention in the lee of a small headland: A variation on the upwelling shadow theme. *J Geophys Res* 110, C10027, doi:10.1029/2005JC002898.
- Roughgarden J, Gaines S, Possingham H. 1988. Recruitment dynamics in complex life cycles. *Science* 241: 1460 - 1466.
- Scotti A, Pineda J. 2007. Plankton accumulation and transport in propagating nonlinear internal front. *J Mar Res* 65: 117 – 145.

- Shanks AL. 2009. Barnacle settlement versus recruitment as indicators of larval delivery. II. Time-series analysis and hypothesized delivery mechanisms. *Mar Ecol Prog Ser* 385: 217 -226.
- Shanks AL, Shearman RK. 2009. Paradigm lost? Cross-shelf distributions of intertidal invertebrate larvae are unaffected by upwelling or downwelling. *Mar Ecol Prog Ser* 385:189 - 204.
- Shanks AL, Grantham BA, Carr MH. 2003. Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves. *Ecol Appl* 13: 159 - 169.
- Shanks AL, Morgan SG, Macmahan J, Reiners AJHM. 2010. Surf zone physical and morphological regime as determinants of temporal and spatial variation in larval recruitment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 392: 140 - 150.
- Shanks AL, Brink L. 2005. Upwelling, downwelling, and cross-shelf transport of bivalve larvae: test of a hypothesis. *Mar Ecol Prog Ser* 302: 1–12.
- Siegel DA, Mitarai S, Costello CJ, Gaines SD, Kendall BE, Warner RR, Winters KB. 2008. The stochastic nature of larval connectivity among nearshore marine populations. *Proc Nat Acad Sci* 105: 8974 –8979.
- Simpson JH, Hyder P, Rippeth TP. 2002. Forced oscillations near the critical latitude for diurnal-inertial resonance. *J Geophys Res* 32: 177 - 187.
- Sobarzo M, Djurfeldt L. 2004. Coastal upwelling process on a continental shelf limited by submarine canyons, Concepción, central Chile. *J Geophys Res* 109, C12012, doi:10.1029/2004JC002350
- Sobarzo M, Bravo L, Moffat C. 2010. Diurnal-period, wind-forced ocean variability on the inner shelf off Concepción, Chile. *Cont Shelf Res* 30: 2043 - 2056.
- Stotz WB, De Amesti P, Martínez DJ, Pérez E. 1991. Lugares de asentamiento y desarrollo de juveniles tempranos de *Concholepas concholepas* (Bruguière, 1789) en ambientes inter y submareales en la IV región, Coquimbo, Chile. *Rev Biol Mar, Valparaíso* 26: 339 - 350.
- Strub PT, Mesías JM, Montecino V, Rutlant J, Salinas S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.), *The Sea*. E – Publishing Inc., New York, pp. 273 - 313.
- Suanda SH, Barth JA, Woodson CB. 2011. Diurnal heat balance for the northern Monterey Bay inner shelf. *J Geophys Res* 116: doi:10.1029/2010JC006894
- Tapia FJ, Pineda J. 2007. Stage-specific distribution of barnacle larvae in nearshore waters: potential for limited dispersal and high mortality rates. *Mar Ecol Prog Ser* 342: 177 - 190.

- Tapia FJ, Navarrete SA. 2010. Spatial patterns of barnacle settlement in central Chile: Persistence at daily to inter-annual scales relative to the spatial signature of physical variability. *J Exp Mar Biol Ecol* 392: 151 - 159.
- Tapia FJ, Navarrete SA, Castillo M, Menge BA, Castilla JC, Largier J, Wieters EA, Broitman BL, Barth JA. 2009. Thermal indices of upwelling effects on inner-shelf habitats. *Progr Oceanogr* 83: 278 - 287.
- Tapia FJ, Pineda J, Ocampo-Torres FJ, Fuchs HL, Parnell PE, Montero P, Ramos S. 2004. High-frequency observations of wind-forced onshore transport at a coastal site in Baja California. *Cont Shelf Res* 24: 1573 - 1585.
- Thiel M, Macaya EC, Acuña E, Arntz WE, Bastias H, Brokordt K, Camus PA, Castilla JC, Castro R, Cortés M, Dumont CP, Escribano R, Fernandez M, Gajardo JA, Gaymer CF, Gomez I, González AE, González HE, Haye PA, Illanes JE, Iriarte JL, Lancellotti DA, Luna-Jorquera G, Luxoro C, Manríquez PH, Marín V, Muñoz P, Navarrete SA, Perez E, Poulin E, Sellanes J, Sepúlveda HH, Stotz W, Tala F, Thomas A, Vargas CA, Vasquez JA, Vega JMA. 2007. The Humboldt Current System of northern and central Chile: Oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback. *Oceanogr Mar Biol: An Annual Review*. 45: 195 - 344.
- Vargas CA, Narváez DA, Piñones A, Navarrete SA, Lagos NA. 2006. River plume dynamic influences transport of barnacle larvae in the inner shelf off central Chile. *J Mar Biol Ass U K* 86: 1057 - 1065.
- Vargas CA, Narváez DA, Piñones A, Venegas RM, Navarrete SA. 2004. Internal tidal bore warm fronts and settlement of invertebrates in central Chile. *Estuar Coast Shelf Sci*. 61: 603 - 612.
- Valle-Levinson A, Moraga J, Olivares J, Blanco JL. 2000. Tidal and residual circulation in a semi-arid bay: Coquimbo Bay, Chile. *Cont Shelf Res* 20: 2009 – 2028.
- Valle-Levinson A, Moraga-Opazo J. 2006. Observations of bipolar residual circulation in two equatorward-facing semiarid bays. *Cont Shelf Res* 26: 179–193.
- Venegas RM, Ortiz V, Olguin A, Navarrete SA. 2000. Larval development of the intertidal barnacles *Jehlius cirratus* and *Notochthamalus scabrosus* (Cirripedia: Chthamalidae) under laboratory conditions. *J Crustacean Biol* 20: 495 - 504.
- Wieters EA, Kaplan DM, Navarrete SA, Sotomayor A, Largier J, Nielsen KJ, Véliz F. 2003. Alongshore and temporal variability in chlorophyll *a* concentration in Chilean nearshore waters. *Mar Ecol Prog Ser* 249: 93 - 105.
- Woodson CB, Eerkes-Medrano DI, Flores-Morales A, Foley MM, Henkel SK, Hessing-Lewis M, Jacinto D, Needles L, Nishizaki MT, O’Leary J, Ostrander CE, Pespeni M, Schwager KB, Tyburczy JA, Weersing KA, Kirincich AR, Barth JA, McManus MA, Washburn L.

2007. Local diurnal upwelling driven by sea breezes in northern Monterey Bay. *Cont Shelf Res* 27: 2289 - 2302.

Yannicelli B, Castro LR, Schneider W, Sobarzo M. 2006. Crustacean larvae distribution in the coastal upwelling zone off Central Chile. *Mar Ecol Prog Ser* 319: 175 - 189.

Zar JH. 1999. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, New Jersey.

