



PEDECIBA-Geociencias

Facultad de Ciencias, Universidad de la República

Tesis de Maestría

CARACTERIZACIÓN DE LA BRISA MARINA EN URUGUAY

GASTÓN MANTA DOMÍNGUEZ

Orientador: Dr. Marcelo Barreiro

Diciembre de 2017

Montevideo, Uruguay

**Tesis presentada como parte de los requisitos para la
obtención del título de Magister en Geociencias.**

Dedicado a los militantes anónimos por la salud de la costa uruguaya. Aquellos que no lo hacen por un sueldo, ni becas, ni títulos, ni papers, ni para proteger su casa frente al mar.



AGRADECIMIENTOS

A las instituciones:

Por el apoyo financiero:



Por los datos brindados:



Por el apoyo logístico para generar datos:



A las personas:

Marcelo, en su segunda entrega como tutor, compañeros del Instituto, al tribunal Madeleine, Rafael y Ángel, familia, amigos y Anita. También a:

Anaía Fein, Alain Ayerra, Álvaro Díaz, Alejandro Gutiérrez, Daniel Conde, Héctor Caymaris, Irene Machado, Diego Lercari, Marcel Winicki, Gabriela Fernández, Shilton y Rolo de Antel-Rocha y el personal de UTE-Rocha, Rodrigo Alonso, Pablo Barrios, Vaclav Hornik, a todo el GRUBU, Prefectura La Paloma, Fredy, Alana, Noelia y Sebastián de INUMET.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
RESUMEN	vi
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Marco teórico del fenómeno de brisa	9
1.2. Teorema de circulación de Bjerknes	10
1.3. Estructura de brisa en superficie y frente de brisa	13
1.4. Factores que determinan la brisa marina	15
1.4.1. Variación diurna de la diferencia de temperatura tierra-mar ...	16
1.4.2. Modificación de la brisa por la costa	17
1.4.3. Modificación de la brisa por condiciones sinópticas	21
1.5. Los modelos numéricos y la brisa marina	23
1.6 Identificación de un evento de brisa marina	24
1.7. Antecedentes de estudio de brisa marina en Uruguay	25
1.8. Objetivos	27
1.9. Predicciones	28
2. PROCESAMIENTO DE DATOS	29
2.1. Datos <i>in situ</i>	30
2.2 Tratamiento de los vectores de vientos.....	35
2.3. Tratamiento y selección de estaciones meteorológicas	37
2.4. Datos de modelos de circulación global y productos satelitales....	45
2.5. Consideraciones sobre el procesamiento de datos.....	50
3. ÁREA DE ESTUDIO: DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMATOLÓGICA	51
3.1. Clima de vientos en la costa uruguaya.....	53
3.2. Clima de temperatura de superficie del aire y del mar en Uruguay	61
3.3. Regionalización de la costa uruguaya según el ciclo diario de vientos y climatología de temperatura del aire y mar	67

3.4. Resumen del área de estudio.....	77
4. CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LA BRISA MARINA	79
4.1. Filtrado de frecuencias mayores a un día.....	80
4.2. Índices de identificación de brisas (IIB) y brisas generalizadas (IIBG).....	84
4.3. Brisas predominantes y brisas ocultas en el flujo sinóptico.....	90
4.4. Aplicación del índice de brisa	92
4.5. Clima de brisas.....	95
4.5.1. Brisas “puras”	96
4.5.2. Brisas ocultas	102
4.5.3. Persistencia de días con brisa	104
4.6. Diferencias entre la brisa marina en el estuario y en el océano ..	107
4.7. Condiciones de escala sinóptica que favorecen la brisa	114
4.7.1. Condiciones sinópticas para brisas de verano.....	117
4.8. Nubosidad asociada al Frente de Brisa vista por satélite.....	126
4.8.1. Frentes de brisa en imágenes del canal visible	127
4.8.2. Frentes de brisa detectados por reflectancia planetaria	129
4.9. Conclusiones.....	133
5. LA BRISA EN ALTA RESOLUCIÓN EN JOSÉ IGNACIO	136
5.1. Índice de Identificación de Brisas en GFS y ERA-INTERIM.....	137
5.2. Estudio de casos	138
5.3. Conclusiones.....	149
6. DISCUSIÓN GENERAL.....	153
6.1. Los datos y el método de identificación de brisas	153
6.2. Sobre el clima de brisas	156
7. CONCLUSIONES GENERALES	166
8. BIBLIOGRAFIA	171
ANEXO I: Fotografías de un caso de brisa marina	176
ANEXO II: Días con brisa marina.....	177

RESUMEN

La brisa marina, más conocida en Uruguay como “virazón”, consiste en un ciclo diario de vientos en la costa generado por el calentamiento diferencial del agua y la tierra. Su estudio es importante para la generación de energía eólica y solar, el turismo, navegación, desarrollo urbano (ej. concentración de contaminantes o efecto isla de calor) entre otros. Se caracterizó la brisa marina en Uruguay entre 2011 y 2016 con datos de 16 estaciones meteorológicas, satelitales y de reanálisis. Se encontró un promedio de 60 días al año con brisa marina que domina sobre el flujo sinóptico (puras) y otros 60 días con brisa marina oculta en el flujo sinóptico, con una variabilidad interanual desde 51 a 71 días de brisas puras en 2014 y 2015 respectivamente. Las brisas puras ocurren con el doble de frecuencia en verano, meses en los que se observa mayor diferencia de temperatura máxima del aire y el agua y menor gradiente de presión atmosférica. Los meses más variables en cantidad de días con brisa son marzo y noviembre. Este fenómeno ocurre a presiones intermedias (altas con respecto a la media de verano), gradiente débil, y predominancia de cielo despejado. No ocurre a presión mayor a 1025 hPa, vinculado a vientos sinópticos del sur y en menor medida del norte. Los días consecutivos con brisa (2 a 7 días) suelen asociarse con el pasaje de sistemas de alta presión en el Atlántico Sudoccidental o bloqueos atmosféricos. Cuando hay brisa marina, suele darse en toda la costa, aunque existen diferencias entre el estuario y el océano, debido a las diferencias entre el acoplamiento agua-aire y la orientación de la costa en relación a los vientos prevalentes del noreste. En promedio, la brisa marina comienza a las 11:00 en el océano y tiene una dirección del sureste mientras que en el estuario comienza a las 12:00 y tiene dirección sur, alcanzando una velocidad máxima media de $7,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ entre las 16:00 y las 17:00. En el 55% de los casos con brisa marina puede observarse una nubosidad tipo cúmulos asociada al frente de brisa que crece y penetra hacia el interior del país hasta cerca de 55 km al atardecer. Este trabajo representa uno de los primeros antecedentes para caracterizar el fenómeno de brisa marina en Uruguay. Comprenderlo contribuye al abordaje de desafíos actuales en diversas disciplinas vinculadas al estudio de la costa.

PALABRAS CLAVE: Brisa marina, Virazón, Clima de vientos, Interacción océano-atmósfera, Costa uruguaya.

1. INTRODUCCIÓN

La brisa del mar, más conocida en Uruguay como “virazón”, consiste en un ciclo diario de vientos en la costa generado por el calentamiento diferencial del agua y la tierra (Balay, 1961; Trimble *et al.*, 2010). El rápido calentamiento superficial de la tierra con respecto al agua, genera un gradiente térmico el cual induce durante el día una celda de circulación de mesoescala con vientos con dirección mar-tierra en superficie y tierra mar en altura. Desde la mañana y con el paso de las horas, el gradiente térmico se intensifica aumentando la velocidad del viento y la penetración tierra adentro de la brisa. Al caer la tarde, la tierra se enfría más rápidamente que el mar, invirtiéndose el fenómeno, generándose una brisa de tierra (Abbs y Physick, 1992). El desarrollo de la brisa suele estar asociado con condiciones de cielo claro y la prevalencia de las condiciones sinópticas (“buen tiempo”¹). Si bien es un fenómeno que ocurre durante casi todo el año, se observa con mayor frecuencia durante el verano, donde el gradiente de temperatura tierra-mar en el ciclo diario suele ser mayor con respecto a las otras estaciones (Estoque, 1962). La brisa genera viento en días calmos aliviando el calor sofocante del mediodía, advecta humedad y

¹ De ahí el fuerte arraigo histórico por parte de usuarios de la costa como pescadores y navegantes de la virazón asociada a la persistencia del “buen tiempo”.

nieblas, puede provocar tormentas y concentra o disipa los contaminantes (Simpson, 1994).

El fenómeno de brisa marina se conoce desde hace miles de años y se ha observado desde el Ecuador hasta los polos, afectando hoy en día al 70% de la población mundial la cual vive en regiones costeras. Los primeros usos que se conocen de este fenómeno son de los navegantes a vela que utilizaban la brisa de tierra a la mañana para adentrarse en el mar y la brisa del mar para regresar a la costa por la tarde, así como la construcción de “captadores de viento”, estructuras que permitían el ingreso y la circulación de aire fresco del mar hacia el hogar en el calor del mediodía. Al día de hoy, se ha multiplicado el interés por el estudio de este fenómeno, alcanzando sectores como la generación de energía eólica, la agricultura, la calidad del aire, el turismo, deportes, entre otros (Miller *et al.*, 2003; Steele *et al.*, 2015).

Magnitudes típicas alcanzadas por la brisa en latitudes medias son 50 km en la dirección horizontal, 1 km en la vertical, 4 °C de diferencia entre la tierra y el mar, y 5 m.s⁻¹ (18 km.h⁻¹) de intensidad del viento en superficie. La escala espacio-temporal que abarca (mesoescala), hace que el fenómeno de brisa marina sufra modificaciones relevantes tanto por procesos de macroescala como las condiciones sinópticas y la rotación de la tierra, como procesos de microescala, como la turbulencia generada por la rugosidad del terreno (Simpson, 1994).

1.1. Marco teórico del fenómeno de brisa

Existen antecedentes de modelos tanto analíticos como numéricos de estudio de brisa. Los modelos analíticos buscan, a partir de simplificaciones en las ecuaciones de conservación de masa y energía, comprender de manera relativamente simple las relaciones de dependencia entre las variables. Por otro lado, los modelos numéricos, alimentados por observaciones, resuelven las ecuaciones en forma numérica y permiten realizar pronósticos o estudiar la respuesta del sistema frente a diferentes escenarios en periodos muy cortos de tiempo (Walsh, 1974). Quizás el primer modelo analítico de brisa surge con el físico y meteorólogo noruego Vilhelm Bjerknes a principios del siglo XX, quién es considerado el padre de la meteorología moderna por introducir la idea de que la atmósfera se comporta de acuerdo a las leyes físicas y que por lo tanto con un conocimiento preciso del estado inicial, resolviendo las ecuaciones sería posible predecir el estado futuro¹¹. Naturalmente el avance de la tecnología y las telecomunicaciones en la segunda mitad del siglo XX, a través del uso de poder computacional, satélites y otros sistemas de observación meteorológica conectados en simultáneo han permitido una rápida

¹¹ "Si es cierto, como cree todo científico, que las situaciones atmosféricas sucesivas se desarrollan a partir de las precedentes de acuerdo a leyes físicas, es entonces obvio que las condiciones necesarias y suficientes para la solución racional del problema de predecir el tiempo son las siguientes:-Un conocimiento suficientemente preciso del estado de la atmósfera en el momento inicial.-Un conocimiento suficientemente preciso de las leyes de acuerdo con las cuales un estado de la atmósfera se desarrolla a partir de otro."(V.Bjerknes, 1904).

expansión de los modelos numéricos en las últimas décadas. Esta introducción pretende hacer una breve reseña del estado del arte de forma cronológica, finalizando en el estado actual del conocimiento en Uruguay.

1.2. Teorema de circulación de Bjerknes

El teorema de la circulación de Bjerknes es un modelo que comienza con una atmósfera en reposo y un gradiente de presión perpendicular a la costa generado por la diferencia de temperatura entre la columna de aire encima del mar, la cual es más densa y baja, y la columna de aire encima de la tierra, menos densa y más alta debido a la expansión térmica. En este caso, aún si la presión es muy parecida en superficie, las isóbaras (superficies de igual presión) se inclinan hacia el mar mientras que las isopícnas (superficies de igual densidad) se inclinan hacia la tierra (más cálida), generando un flujo océano-tierra en superficie y tierra-océano en altura (Fig.1.1). El resultado del movimiento será inclinar las isopícnas de tal forma que se vuelvan más paralelas a las isobaras, o sea, tiende a una situación barotrópica en la cual el cambio en la circulación sería nulo. Tal circulación también baja el centro de masa del fluido y reduce la energía potencial del sistema. Esta reducción de la energía potencial es una conversión a energía cinética del movimiento, conservando la energía total (Holton y Hakim, 2012).

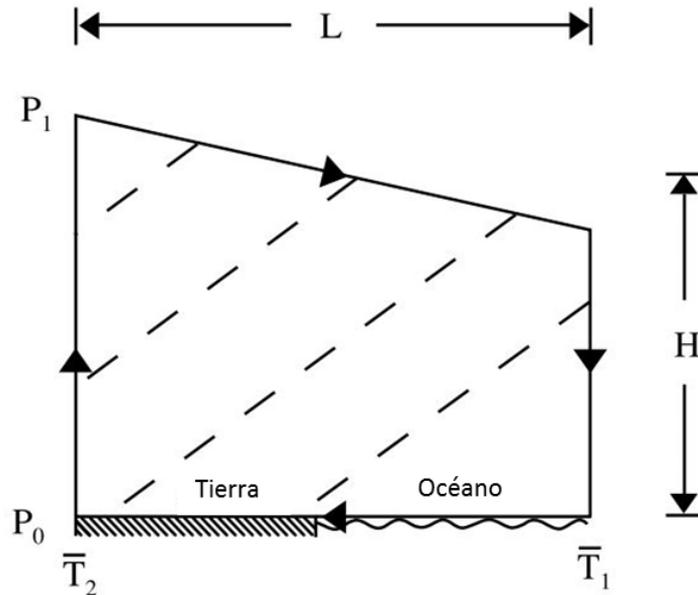


Figura 1.1. La brisa marina y el teorema de la circulación de Bjerknæs. La tierra está a la izquierda, el océano está a la derecha. Las flechas indican el sentido de la circulación. T_1 y T_2 indican la temperatura media a través de las columnas verticales sobre las superficies de la tierra o el mar. Las líneas punteadas son isopícnas, con un aire más denso en la parte inferior derecha. P_0 y P_1 son la presión en superficie y altura respectivamente. L y H son la extensión horizontal y vertical de la celda de circulación, respectivamente. Modificado de Miller *et al.* (2003).

Usando el teorema de circulación, es posible encontrar la siguiente expresión para la aceleración del viento:

$$\frac{D\bar{U}}{Dt} = \frac{R \ln\left(\frac{p_0}{p_1}\right) (\bar{T}_2 - \bar{T}_1)}{2(H + L)} \quad (1.1)$$

El término a la izquierda de la igualdad indica la tasa de cambio de la velocidad media con respecto al tiempo (la aceleración). R es la constante

universal de los gases. Las otras variables son las indicadas en la Figura 1.1. Si tomamos valores de $P_0=1000$ hPa, $P_1=900$ hPa, $T_2-T_1=10$ °C, $L=20$ km, $H=1$ km, la ecuación anterior genera una aceleración de $7 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-2}$. Este modelo simplificado produce una velocidad de 25 m.s^{-1} en 1 hora, mientras que los valores observados de brisa no suelen superar los 10 m.s^{-1} . Esto se debe a que a medida que el viento aumenta, la fricción reduce la aceleración y la advección de temperatura reduce el contraste de temperatura mar-tierra (Holton y Hakim, 2012). El modelo de Bjerknes permite encontrar una solución analítica entre las variables y, desde ya, sospechar la importancia de la turbulencia en la disipación de energía del sistema. Los términos correspondientes a la turbulencia, son en general un problema al momento de modelar y predecir el comportamiento de un fluido. Son no lineales y suelen parametrizarse como un movimiento aleatorio multiplicado por un coeficiente calculado empíricamente. La turbulencia adquiere mayor relevancia en el movimiento en la capa límite planetaria (CLP), definida justamente como aquella capa influenciada por la fricción con la tierra. Tiene un espesor variable según la intensidad de los flujos de calor y la rugosidad del terreno, alcanzando en promedio cerca de 1000 metros. En la CLP, los movimientos verticales son intensos y la velocidad del flujo horizontal crece exponencialmente desde cero en el punto de contacto con la tierra hasta la “atmósfera libre”, que es la capa por encima de la CLP donde el flujo se considera geostrófico y sin fricción (Kundu y Cohen, 1990). A continuación se describe la estructura de la

circulación de la brisa en superficie, la cual suele ser el foco de interés del fenómeno.

1.3. Estructura de brisa en superficie y frente de brisa

Un gradiente horizontal de densidad en un fluido geofísico genera una corriente de gravedad (también llamada de densidad) en la que el fluido más denso desplaza al de menor densidad a una velocidad proporcional al gradiente. La penetración de la brisa marina hacia la tierra en superficie es una corriente de gravedad (Kundu y Cohen, 1990). El aire húmedo y fresco más denso penetra en forma de cuña debido a la fricción con la superficie desplazando al aire cálido sobre la tierra formando el frente de brisa (FB). Este aire cálido es obligado a ascender y suele condensar formando una franja de nubes tipo cúmulos paralelo a la costa, las cuales pueden generar precipitaciones (Simpson, 1994). Estas nubes permiten realizar un seguimiento de la penetración del FB a través de imágenes satelitales (Planchon *et al.*, 2006). Detrás del FB, donde el aire también es obligado a ascender, en este caso debido a la convergencia de las masas de aire, la velocidad del viento es mayor, y se forma la cabeza del frente de brisa (CFB). Por encima del frente y con un espesor similar, el aire cálido menos denso que se mueve a mayor velocidad y en dirección contraria al húmedo por debajo, genera unas ondas llamadas de Kelvin-Helmholtz, que luego se desestabilizan formando una estela turbulenta (Fig. 1.2). No todos los eventos de brisa generan la franja de cúmulos ni ondas de Kelvin-

Helmholtz, debido principalmente a que esta circulación de mesoescala es modificada por varios factores que se describen en la siguiente sección.

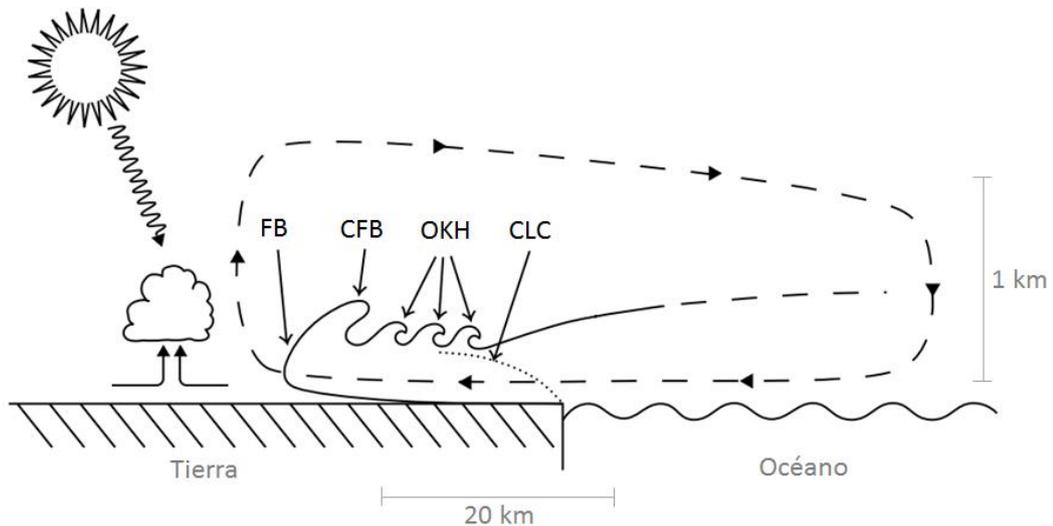


Figura 1. 2. Representación esquemática de la estructura de la brisa marina. La línea punteada con flechas representa la celda de circulación. En superficie, el frente de brisa (FB) penetra con forma de cuña, detrás se distingue la cabeza del frente de brisa (CFB) con mayor desarrollo vertical, seguido por las ondas de Kelvin-Helmholtz (OKH). La línea punteada indica la capa límite convectiva (CLC), esta puede concentrar los contaminantes. A la izquierda, el aire sobre la tierra es obligado a ascender y condensa formando nubes tipo cúmulos. Modificado de Miller *et al.* (2003).

El borde delantero de la brisa, donde el aire húmedo del mar se encuentra con el aire más cálido y menos denso de la tierra es denominado el frente de brisa (FB). El FB puede visualizarse desde satélite penetrando tierra adentro hacia primeras horas de la tarde, como se muestra en la figura 1.3, aunque no todos los fenómenos de brisa marina tienen necesariamente un FB con una banda de cúmulos marcada.

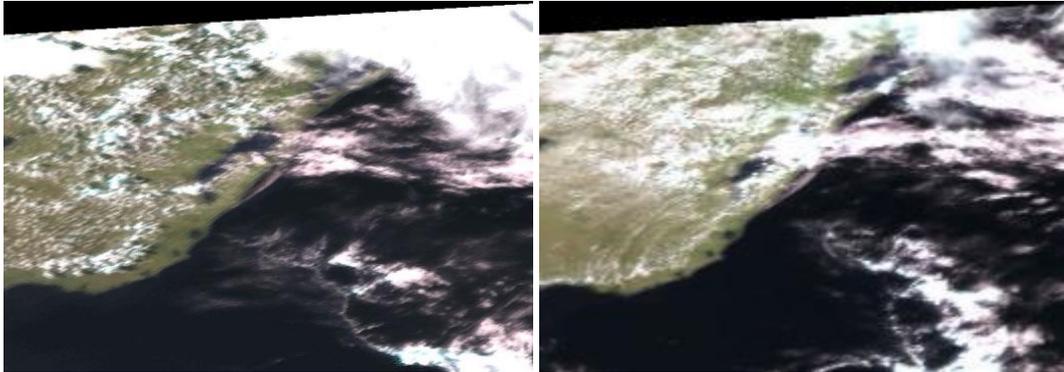


Figura 1.3. Penetración del frente de brisa (FB) en la costa uruguaya el día 22 de Febrero de 2015 a las 16:12 y 18:57 UTC a la izquierda y derecha, respectivamente. Fuente METEOSAT-10, (imagen coloreada). A medida que avanza el FB, los cúmulos crecen. Algunas fotografías desde superficie para este tipo de nubosidad para otro día se muestran en el Anexo I.

1.4. Factores que determinan la brisa marina

Existen varios factores que afectan y modifican la celda de circulación de brisa y deben ser tenidos en cuenta a la hora de su comprensión y modelación física. Estos son:

1. la variación diurna de la diferencia de temperatura tierra-mar
2. la difusión de calor
3. la estabilidad vertical
4. fuerza de Coriolis
5. la topografía
6. viento predominante

Los primeros tres son las responsables de generar el gradiente térmico responsable del desarrollo de la brisa, los siguientes dos principalmente restringen su desarrollo, mientras que el último la modifica de manera tal que puede impedir su desarrollo, e incluso se ha generado una clasificación de las brisas en función de la dirección e intensidad del viento prevalente (Miller *et al*, 2003). Los modelos de predicción de brisa suelen incluir como variables la variación diurna de la diferencia de temperatura tierra-mar y el viento predominante, mientras que los factores de difusión y estabilidad son parametrizados a través de coeficientes. A continuación se detallan los efectos de dichos factores y algunas soluciones analíticas y empíricas.

1.4.1. Variación diurna de la diferencia de temperatura tierra-mar

La variación diurna de la diferencia de temperatura tierra-mar es el principal responsable de la ocurrencia de la brisa. La velocidad del viento es proporcional a este gradiente térmico como se mostraba en el modelo de Bjerknes. Walsh (1974) incluyó los factores antes mencionados y utilizó las ecuaciones linealizadas de Boussinesq con rotación, viscosidad, conducción y una estratificación media. Esto le permitió modelar la brisa marina en dos dimensiones, encontrando una solución analítica para la velocidad del viento en función de la temperatura muy similar a observaciones de Biggs y Graves (1962), en los cuales también incluyó los coeficientes calculados empíricamente (Fig. 1.4).

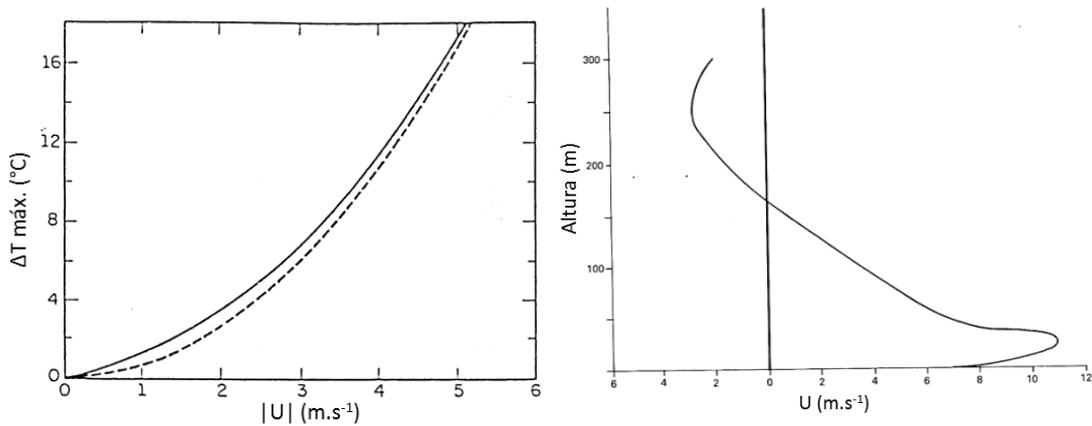


Figura 1. 4. A la izquierda se muestra el incremento del módulo de la velocidad del viento generado por la brisa marina en superficie según la diferencia de temperatura entre el aire y el mar. La línea punteada indica valores observados según Biggs y Graves (1962) y la línea sólida indica el valor teórico según la ecuación según Walsh (1974). A la derecha, el perfil vertical del viento perpendicular a la costa. Tomado de Simpson (1994).

1.4.2. Modificación de la brisa por la costa

En esta sección se agrupan todos los factores que modifican la brisa marina y no dependen de las condiciones sinópticas. Son en su mayoría debido a la geografía física del lugar, y por lo tanto no suelen cambiar naturalmente en escalas de tiempo cortas. Por otro lado, el efecto de estos factores sobre la brisa son sitio-dependientes ya que estos interaccionan. La orografía y la fuerza de Coriolis limitan la penetración de la brisa hacia la tierra. La altitud y la rugosidad del relieve tienden a eliminar el gradiente de presión necesario para la persistencia del viento a través de la turbulencia generada por la fricción y consecuente mezcla de masas de aire. A su vez, obliga al

aire a ascender. Este generalmente húmedo, condensa y forma nubosidad (Simpson, 1994).

La fuerza de Coriolis, la cual crece hacia los polos, tiende a torcer el flujo paralelo a las isóbaras, limitando la penetración tierra adentro de la brisa. Existen números adimensionados para estimar la relevancia de cada forzamiento según la escala del movimiento. Por ejemplo, el número de Rossby compara la advección con la aceleración de Coriolis:

$$Ro = U/Lf \quad (1.2)$$

Donde $f=2\Omega\sin\phi$ es el parámetro de Coriolis, siendo Ω la velocidad angular de rotación planetaria y ϕ la latitud. U es una velocidad típica y L una extensión horizontal del movimiento. Cuando $Ro \gg 1$ los efectos de la rotación planetaria no son importantes y no es necesario considerarlos. Cuando $Ro \ll 1$ los efectos de la rotación planetaria son importantes y el movimiento tiende al balance geostrófico.

Un valor típico de brisa marina son $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a lo largo de 40 km. Un valor promedio de f para Uruguay es de $-1.23 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, de modo que $Ro \sim 10$, por lo que ambos términos son relevantes en el movimiento, siendo la aceleración generada por el gradiente de presión un orden de magnitud mayor. En general, la influencia de Coriolis sobre la brisa consiste en limitar la penetración del frente tierra adentro, torciendo el flujo paralelo a las isóbaras (hacia la izquierda en el hemisferio sur) y por lo tanto paralelo a la costa asumiendo una costa recta y un flujo perpendicular. Según Niino

(1987), asumiendo un comportamiento lineal de la brisa, para la latitud en la que está ubicado Uruguay el límite teórico de extensión de la brisa en el cual el flujo se vuelve paralelo a la costa es cerca de 60 km para un viento exclusivamente de brisa (Fig. 1.5).

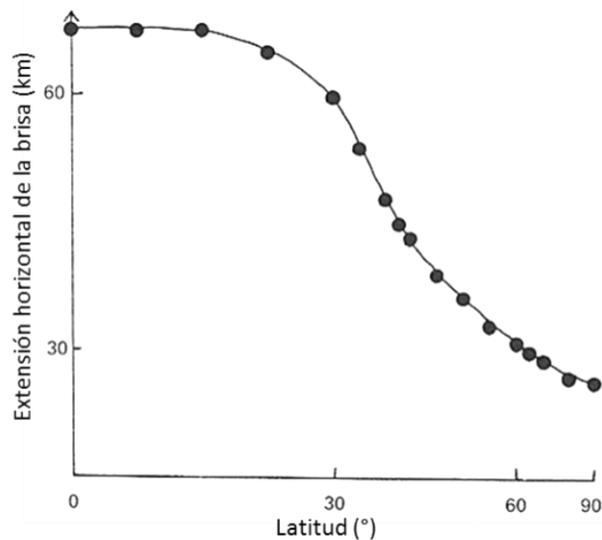


Figura 1.5. Máxima extensión horizontal que puede tomar la brisa según la latitud antes de ser torcida por Coriolis hasta una dirección paralela a la costa. Según Niino (1987).

El gradiente térmico tierra-mar, motor del desarrollo de la brisa, varía según todas las escalas espacio-temporales. A gran escala, la temperatura de la tierra depende de la radiación que llega a la superficie dada por la latitud y el día del año. Factores como las grandes corrientes oceánicas también influyen, ya que distribuyen el calor en el océano de forma heterogénea. En latitudes medias, las costas al este de los continentes suelen tener

corrientes cálidas y por lo tanto agua más calientes durante todo el año que las costas del oeste donde fluyen corrientes frías. A escala más local, el uso del suelo dado principalmente por la capacidad calorífica afecta este gradiente-térmico. La arena y el asfalto suelen enfriarse y calentarse más rápidamente que la cobertura vegetal (Simpson, 1994). La urbanización costera también modifica el comportamiento de la brisa marina. El efecto isla de calor hace que el viento sea más intenso en etapas iniciales y a su vez que la brisa dure más tiempo. Son varios los trabajos recientes que han estudiado el efecto de la urbanización en la transformación de la brisa marina (ej. Pazandeh, 2016; Steele *et al.*, 2015). Los edificios bloquean y modifican la dirección del flujo dependiendo la altitud y orientación de estos (Miller *et al.*, 2003).

La forma de la costa puede fortalecer o debilitar la convergencia y la convección a lo largo de un frente de brisa marina. El flujo de aire del mar hacia un litoral de forma cóncava, como una bahía, se vuelve divergente. El flujo divergente impide la convergencia y el ascenso del aire a lo largo del frente de brisa marina. Sin embargo, cuando la costa es convexa el flujo de aire hacia tierra firme se torna convergente, lo cual intensifica la convergencia y el ascenso del aire a lo largo del frente de brisa marina. Los cabos y las puntas son ejemplos de fronteras océano-tierra con forma convexa que a menudo se asocian con un aumento en la convección y las tormentas (The COMET Program, 2015). La figura 1.6 muestra un ejemplo

en la península de Florida (EE.UU); es importante notar la escala, ya que las bahías tienen cientos de kilómetros.

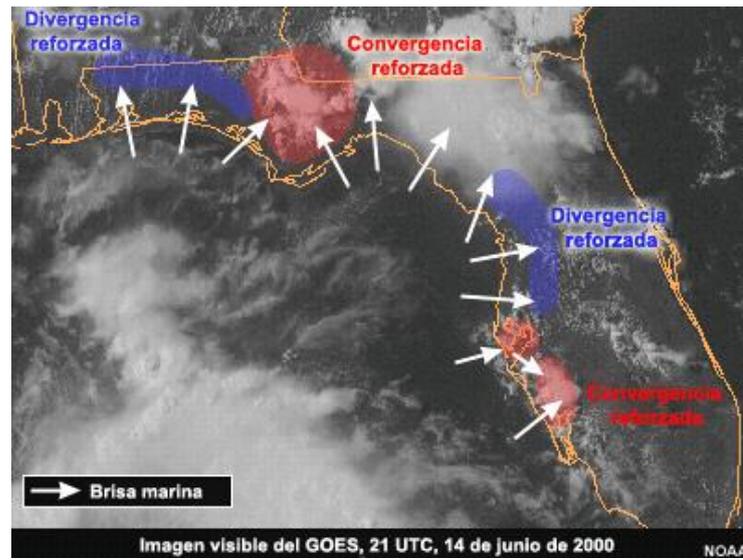


Figura 1.6. Efecto de la morfología costera sobre el desarrollo de la nubosidad asociada al ingreso de la brisa marina en la península de Florida, EEUU, con un largo aproximado de 600km. Fuente: The COMET Program.

1.4.3. Modificación de la brisa por condiciones sinópticas

Si se introduce un flujo de gradiente de presión a gran escala asociado a los sistemas sinópticos, de ahora en más denominado viento predominante (VP), la celda de circulación de brisa marina se distorsiona. Para un VP *off-shore*, el gradiente de presión tierra-mar asociado con el desarrollo de la brisa del mar se opone directamente al VP. El gradiente de brisa por lo tanto debe inducir vientos que superen el de gran escala para que se observe

una brisa marina. De esta manera se retrasa el tiempo de inicio de la brisa del mar y se reduce el grado de penetración hacia la tierra.

El viento en contra del avance del frente de la corriente de densidad, en el caso de flujo sinóptico cálido con dirección *off-shore*, tiende a reducir el desarrollo vertical de la cabeza del FB “achatándolo”, disminuyendo la pendiente, la formación de las ondas de Kelvin-Helmholtz y enlenteciendo el avance hacia tierra en cerca de aproximadamente tres quintos del viento aplicado, hasta el punto en el que un viento *off-shore* muy fuerte evita la formación de la brisa (Simpson y Britter, 1980).

Si el gradiente de presión de gran escala que genera vientos *off-shore* es de intensidad moderada, entonces el desarrollo de la brisa se restringe a alta mar, generando una zona de convergencia estáticamente estable y por lo tanto los movimientos verticales se suprimen. Si los vientos *off-shore* son lo suficientemente fuertes, entonces el gradiente térmico no logra generar una brisa marina. La magnitud de estos umbrales críticos son variables para cada caso de estudio. Crosman y Hotel (2010) mediante simulaciones numéricas identifican que entre 6 y 10 m.s⁻¹ de intensidad de viento sinóptico la brisa puede formarse en alta mar y entre 6 y 11 m.s⁻¹ puede no formarse, dependiendo de las condiciones de contraste térmico tierra-mar. El desarrollo de la brisa en relación a la orientación del viento generado por las condiciones sinópticas ha generado lugar incluso a clasificaciones de los diferentes tipos de brisa marina (Miller *et al.*, 2003).

1.5. Los modelos numéricos y la brisa marina

El aumento de los sistemas de observación y poder computacional de procesamiento de datos en tiempo real, ha provocado que los modelos numéricos adquieran una gran relevancia en la capacidad de comprensión y predicción del estado tanto de la atmósfera como de los océanos. Es claro que en la actualidad los modelos de mesoescala reproducen la brisa marina; la pregunta es que tan bien lo hacen. La mayor limitante que tienen es la resolución espacio-temporal que poseen. Estos tienden a subestimar el gradiente térmico tierra-mar y por lo tanto la intensidad del viento a la costa. A su vez, la resolución horizontal subestima la complejidad del relieve y la morfología pudiendo llevar a errores en la estimación de la dirección del viento entre otros^{III}. Por otro lado, una buena resolución vertical es necesaria para representar los procesos en la capa límite y por ende la brisa marina (The COMET Program, 2016; Fig.1.7).

^{III} Páginas web que muestran el pronóstico de los modelos para la práctica de deporte náuticos como Windguru.cz permiten al usuario personalizar puntos insertando “modificaciones de viento”, básicamente un porcentaje de incremento o decremento según la dirección para corregir sesgos que escapan a la resolución de los modelos.

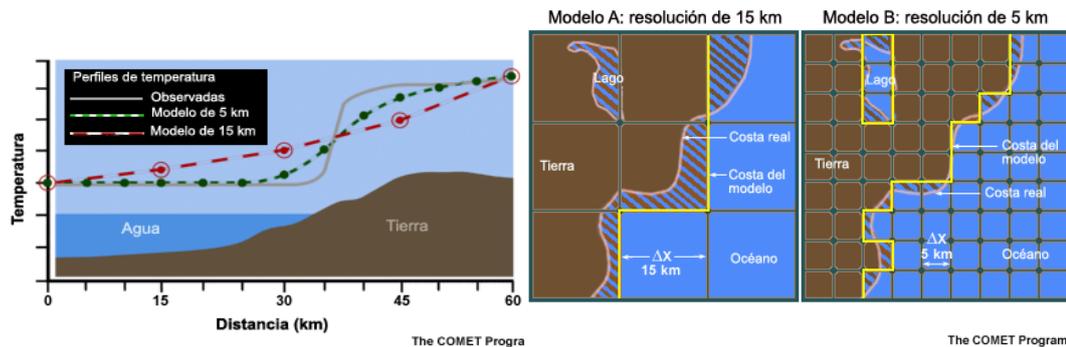


Figura 1.7. Izquierda: temperatura observada sobre un eje perpendicular a la costa, y la respectiva representación de un modelo de resolución de 5 y 15 km. Derecha: se observa la morfología de la costa y la representación que hacen de esta cada uno de los modelos de 5 y 15 km de resolución horizontal. Tomado de The COMET Program.

1.6 Identificación de un evento de brisa marina

La identificación de eventos de brisa es central para su comprensión y predicción. Varios autores señalan la necesidad de adaptar una definición sitio-específica debido a las modificaciones que puede sufrir la brisa (ej. Simpson, 1994). Sin embargo, existen algunas condiciones generales que aplican a la mayoría de los casos, las cuales han llevado al desarrollo de índices para la identificación de un evento de brisa marina (ej. Biggs y Graves, 1962; Steele *et al.*, 2015). Estas condiciones son la de viento sinóptico suave, un gradiente de temperatura tierra-mar significativo y aumento en la intensidad del viento acompañado de una rotación en la dirección *on-shore* en un período corto de tiempo cercano al mediodía. También, el incremento abrupto en la temperatura de punto de rocío, la

estabilización o descenso de la temperatura y el aumento de la turbulencia medido como cambios en la intensidad y dirección del viento en un período corto de tiempo, han sido considerados para identificar la entrada del FB (Alpert y Rabinovich-Hadar, 2003; Simpson, 1994). El aumento en la temperatura de punto de rocío se da pues el aire que viene del mar tiene un mayor contenido de humedad y se considera un buen indicador del ingreso de la brisa marina, ya que no cambia en una masa de aire al ser calentada o enfriada (Simpson, 1994).

1.7. Antecedentes de estudio de brisa marina en Uruguay

La brisa marina en Uruguay es conocida desde hace mucho tiempo por residentes y usuarios de la costa. Utilizada principalmente por navegantes, en los últimos años ha despertado mayor interés por los parques generadores de energía eólica y los muchos deportes náuticos emergentes como el *kitesurf*, siendo cada vez más frecuente ver las cometas en la playa a media tarde cercano a la hora pico de intensidad del viento de brisa.

No se han encontrado antecedentes específicos de caracterización de la brisa marina en Uruguay. Sin embargo, existen varios trabajos vinculados al estudio de vientos en el que la brisa es considerada, dirigidos principalmente al estudio de la calidad de las uvas para vino (ej. Pienika y Cataldo, 2012) donde incluso reportan un evento de brisa a 28 kilómetros de la costa con una disminución de 4°C asociada al ingreso del frente de brisa (Fourment *et al.*, 2014) y a la generación de energía, ya sea eólica (ej.

Gutiérrez, 2011; De Mello *et al.*, 2015) o undimotriz (Alonso, 2012). Estos han sido desarrollados principalmente en Facultad de Agronomía o el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería en conjunto con otros entes públicos (*ej.* Programa de Energía Eólica, <http://www.energiaeolica.gub.uy/>). Un ejemplo de aplicación del estudio de vientos en el que está inserta la brisa es el parque eólico Ing. Emanuelle Cambilargiu, en Sierra de Caracoles (Maldonado). Se conoce empíricamente que la región con mayor intensidad media de viento se ubica en la costa atlántica uruguaya, principalmente en la región de las sierras, donde su orientación transversal a la dirección de viento predominante provoca la contracción de las líneas de flujo y por consiguiente un incremento de la velocidad media. Es allí donde se ubican los aerogeneradores, de cara a la costa y a 40 km de distancia (Gutiérrez, 2011). A su vez, la climatología mensual y horaria de registros en el parque indica que la mayor intensidad de viento se ubica en primavera-verano en entre las 14:00 y las 18:00, y que también el máximo de crecimiento de generación de energía eólica se ubica entre los 5 y 10 m.s⁻¹ (MIEM ,2006). Entre estos valores y horarios debería ubicarse el pico máximo de intensidad de brisa.

1.8. Objetivos

El objetivo general de tesis es caracterizar el clima de brisa marina en Uruguay. Para ello se plantean las siguientes preguntas específicas a responder:

- ¿Cuál es el promedio mensual de días con brisa?
- ¿Qué intensidad de viento y extensión tierra adentro alcanza?
- ¿Existen diferencias entre la costa atlántica y del Rio de la Plata en el comportamiento de la brisa?
- ¿Bajo qué condiciones sinópticas así como de temperatura de tierra y mar se desarrolla este fenómeno en Uruguay?
- ¿Cuál es la proporción de días con brisa en el que se observa la nubosidad asociada al frente de brisa por satélite?

1.9. Predicciones

Eventos de brisa marina ocurren durante gran parte del año en la costa uruguaya, siendo verano la estación con mayor frecuencia de ocurrencia debido a que ocurren los mayores gradientes térmicos.

Vientos sinópticos intensos principalmente del norte (cálidos) del SO (pampero) asociados con gradientes de presión intensos impiden el desarrollo de la celda de circulación de brisa marina.

Existen días donde la brisa marina predomina ante el flujo sinóptico, otros en los que se desarrolla con viento sinóptico y el viento resultante es la suma de ambos, y otros días en el que la brisa directamente no se desarrolla.

La brisa marina comienza antes en la costa atlántica que en la del Río de la Plata en verano ya que en estos meses el agua oceánica es más fría y por lo tanto se alcanza el gradiente térmico necesario más temprano.

Existe variabilidad interanual en la cantidad de días con brisa debido a que se observa variabilidad interanual en las condiciones sinópticas como de temperatura del aire y mar.

2. PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el estudio de la brisa se conformó una base de datos con series temporales de viento y temperatura del aire y mar representativos de la costa uruguaya. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- Búsqueda de datos *in situ* en la costa (meteorológicos y oceanográficos) y realización de un mínimo control de calidad. La búsqueda se realizó principalmente en instituciones públicas como el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), Instituto Nacional de Meteorología Brasileiro (INMET), Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) y Facultad de Ciencias (FCIEN), mientras que el control de calidad consistió en la búsqueda y remoción de datos erróneos (ej. Valores imposibles de registrar, o 0 como identificador de ausencia de dato).

- Generación de una base de datos comparable alineando los datos con un paso temporal homogéneo.

- Evaluación de la utilidad de los datos satelitales y de reanálisis atmosféricos para el estudio de brisa marina en Uruguay.

Luego de generar la base de datos comparables y confiables, se construyó climatologías de viento y temperatura para las estaciones, y realizó análisis de agrupamientos, de modo de comprender el comportamiento promedio de las variables así como para encontrar zonas que se puedan diferenciar unas de otras.

A continuación se identificaron las estaciones más representativas de cada región, a través de análisis de correlación lineal y agrupación de cluster entre estas.

2.1. Datos *in situ*

Los datos meteorológicos *in situ* corresponden a 16 estaciones meteorológicas con resolución temporal horaria cubriendo desde el 1 de enero de 2011 hasta el 28 de febrero de 2017. Todas tienen al menos un año de registros. En casos específicos se utilizaron estaciones con una resolución temporal de hasta 10 minutos, mientras que para la mayor parte del trabajo se utilizó la resolución horaria ya que es la mínima resolución con la que contaban todas las estaciones. Todas ellas tienen mediciones de viento, 15 de ellas cuentan con temperatura del aire, 3 de ellas con presión en superficie y 4 con valores radiación. La tabla 2.1 detalla las características de cada una de estaciones, y las figuras 2.1, 2.2 y 2.3 la distribución temporal de los datos, la ubicación geográfica y contexto topográfico.

Tabla 2.1. Estación, código, dependencia, altura de medición (H), frecuencia de registro, intervalo de medición de dirección, elevación y distancia a la costa para cada estación utilizada. En varios casos de las torres de UTE, la dirección del viento se mide a diferente altura que la velocidad. (*) La temperatura medida es de otra torre a 1 km de distancia. A su vez, la dirección se mide a 40 m hasta el 15/03/2015 y luego a 14. (**) Estimado. (***) La frecuencia de registro es heterogénea, la media es menor a 10 min.

Estación	Código	Dependencia	H (m) vel-dir- temp	Frec. (min)	Int. dir. (°)	Elev. (m)	Dist. a costa (km)
Colonia	CLN	INUMET	10-10-1,5	60	10	20	1,7
Artilleros	ART	UTE	27	10	1	23	1,5
Kiyú	KIY	UTE	30	10	1	26	7
Florida	FLR	UTE	41	10	1	150	105
Carrasco	CRR	INUMET	10-10-1,5	60	10	32	3,5
San Luis	SLS	UTE	36	10	1	90	10,4
Laguna del Sauce	LGS	INUMET	10-10-1,5	60	10	34	1,9
Punta del Este	PDE	INUMET	10-10-1,5	60	10	16	21
José Ignacio	JIG	UTE	40-40-7,8*	10	1	23	1,6
Boya Petrolera	BP	ANCAP	6-6-6**	<10***	1	2	<1
Las Garzas	GRZ	FCIEN	6-6-2	15	22,5	13	<1
Rocha	RCH	INUMET	10-10-1,5	60	10	18	21
Lascano	LSC	UTE	36	10	1	16	54
Cabo Polonio	CPL	FCIEN	6	60	1	4	<1
Esmeralda	ESM	UTE	31	10	1	19	3,8
Chuy	CHY	INMET	7-7-2	60	1	9	<1

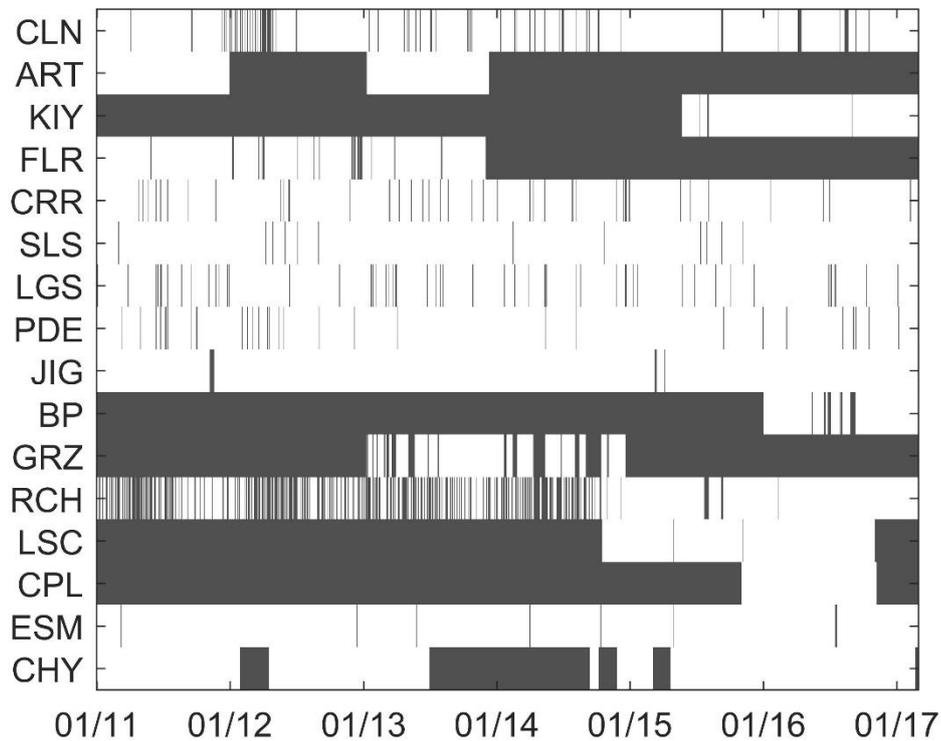


Figura 2.1. Período en los que se cuenta con dato (en blanco) de velocidad y dirección de viento según el tiempo y la estación. Los datos de temperatura del aire tienen una distribución muy similar, con excepción de KIY (JIG) donde el registro es mayor (menor).

Se cuenta con tres fuentes de datos oceanográficos y la variable que se utilizó fue la temperatura del mar medida por CTD (la sigla en inglés de Conductivity-Temperature-Depth). Uno se ubica en la bahía de Montevideo (MV), otro en la boya petrolera de José Ignacio (BP), y otro en la boya de balizamiento del bajo del 18 de julio en La Paloma (LP), midiendo a profundidades de 1,5m en MV y BP y 0,5m en LP. El único periodo de solapamiento de registros es entre BP y LP en el verano de 2017 (Fig. 2.2). MV está instalado en la salida de agua de la Central Termoeléctrica Batlle,

aunque no hubo prácticamente descargas durante el periodo de medición que hayan podido cambiar la temperatura del mar. De todos modos, el lugar de medición parecería representativo de no mucho más allá que dentro de la bahía, por encontrarse en una zona somera y de baja circulación. BP pertenece al registro de temperatura del mar como sensoramiento continuo en la Boya de la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP) en José Ignacio donde se abastece el petróleo. En dos casos el sensor fue arrasado por tormentas y a continuación hubo un periodo sin registro de al menos un mes, así como hubo otras ocasiones donde los registros respondían más a variaciones de la temperatura del aire que del mar (ciclo diarios de 5-7 °C). Esto sucedió debido al estancamiento de agua circundante al sensor. Los días en que se observaron estas fluctuaciones fueron descartados. El instrumento en LP es un sensor Star Oddi DST-CTD, ubicado 2,5 km mar adentro frente a la playa de la Aguada en La Paloma. LP y MV registran cada 10 minutos, mientras que BP presenta un paso temporal heterogéneo, ya que registra cada vez que se supera un umbral de variación previamente definido según la variable.

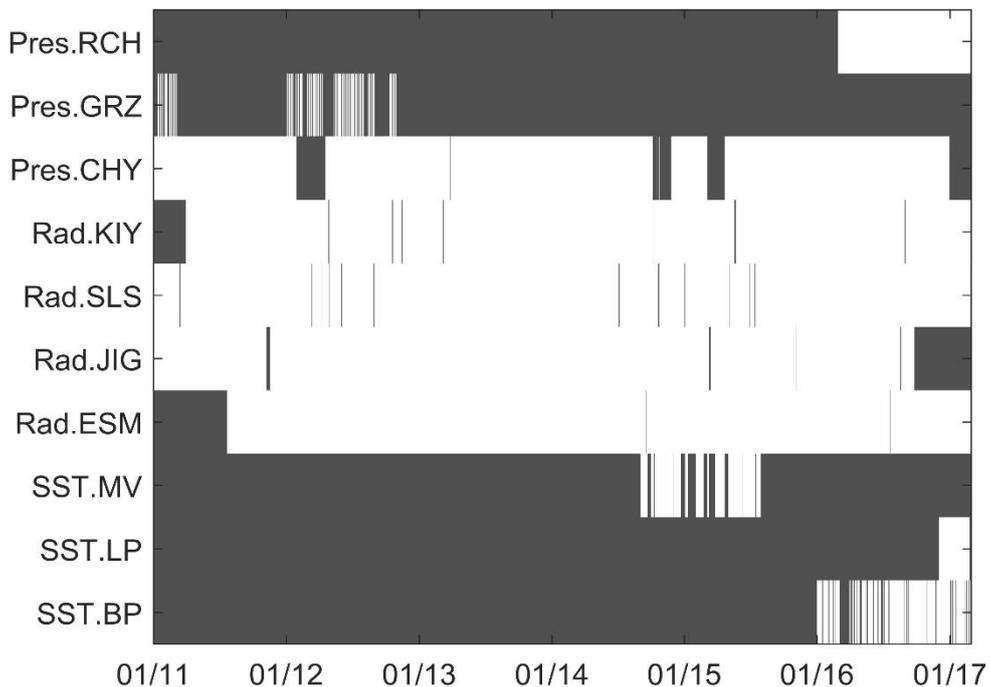


Figura 2.2. Periodo en los que se cuenta con datos (en blanco) de Presión (PRES), Radiación (RAD) y temperatura superficial del mar (SST) según el tiempo y cada estación.

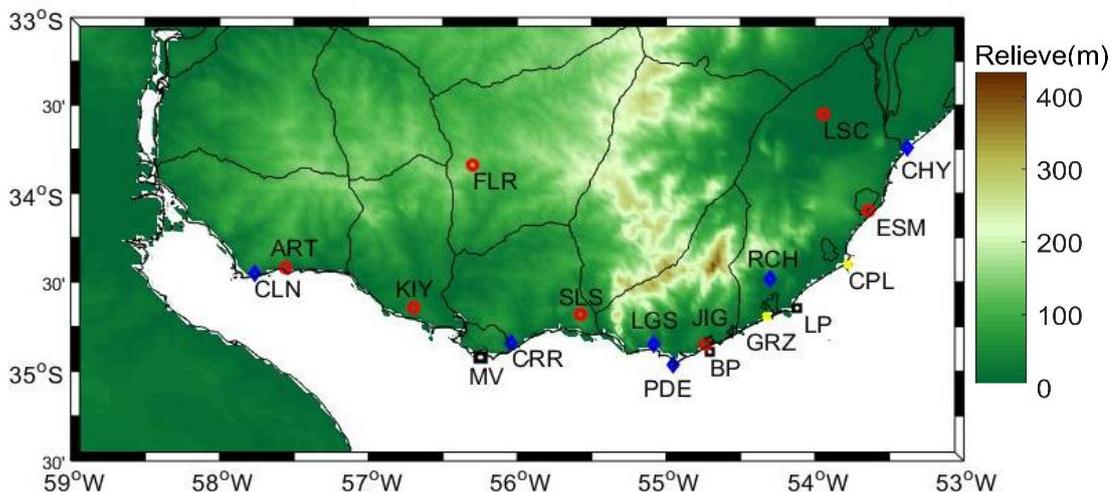


Figura 2.3. Localización de las estaciones meteorológicas y oceanográficas. En rojo las de UTE, azul INUMET e INMET y amarillo Facultad de Ciencias. En negro, CTDs que miden temperatura del mar. Los colores en sombras indican el relieve. Topografía de Smith y Sandwell, (1997) versión 8.

2.2 Tratamiento de los vectores de vientos

Para todos los cálculos en que se involucró a la dirección del viento se utilizaron los vectores u y v , siendo estos la componente zonal y meridional del viento, positivo hacia el este y norte respectivamente. Esto permite evitar problemas de promediar la dirección del viento del valor en grados, ya que el cambio de dirección entre 0° y 360° es mínimo en cuanto a la dirección pero contribuyen de manera muy distinta al promedio escalar^{IV}.

u y v se calculan de la siguiente manera:

$$u = -spd. \sin \left(dir. \pi. \frac{1}{180} \right) \quad (2.1)$$

$$v = -spd. \cos \left(dir. \pi. \frac{1}{180} \right) \quad (2.2)$$

Donde spd ($m.s^{-1}$) es el módulo de la velocidad y dir ($^\circ$) es la dirección, y u y v son ahora la componente zonal y meridional del viento ($m.s^{-1}$) respectivamente.

Luego, se puede recuperar la velocidad y dirección de la siguiente manera:

$$wind\ abs = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (2.3)$$

$$wind\ dir = \arctan \left(\frac{u}{wind\ abs}, \frac{v}{wind\ abs} \right) \left(\frac{180}{\pi} \right) + 180 \quad (2.4)$$

^{IV} A modo de ejemplo, el promedio escalar entre dos registros de dirección de 0° y 359° , da como resultado 180° , lo cual corresponde con viento sur, cuando debería ser viento norte.

Donde \arctan es la función *arcotangente* definida para los cuatro cuadrantes, y $wind\ abs$ y $wind\ dir$ son la velocidad y dirección recuperadas respectivamente. La suma de 180 al final de la ecuación para calcular $wind\ dir$ permite obtener el viento en la convención meteorológica de “desde donde viene”.

En varios casos se utilizó la componente perpendicular (*across-shore*) y paralela (*along-shore*) a la costa, ya que el viento de brisa estaría caracterizado por la componente perpendicular a la costa. Para ello se rotaron u y v de la siguiente manera:

$$along\ shore = (u \cdot \cos(\alpha)) + (v \cdot \sin(\alpha)) \quad (2.5)$$

$$across\ shore = -(u \cdot \sin(\alpha)) + (v \cdot \cos(\alpha)) \quad (2.6)$$

Donde α es el ángulo del eje de la costa, el cual se aproximó por tramos de la siguiente manera: Colonia hasta Laguna del Sauce ($\alpha = 0$), Punta del este a las Garzas ($\alpha = 30$) y Cabo Polonio al Chuy ($\alpha = 60$). La figura 2.4 muestra un ejemplo gráfico de la transformación de los vectores para la estación Chuy.

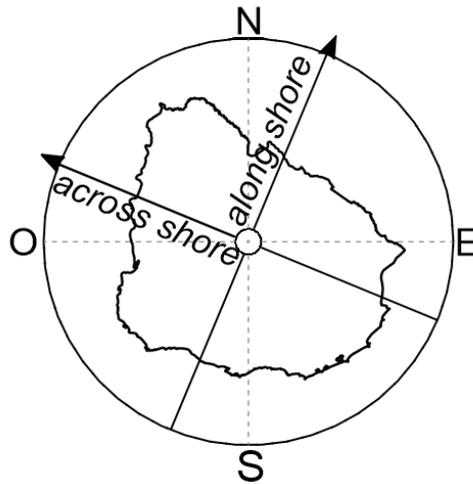


Figura 2.4. Esquema de la rotación de ejes utilizado para la estación del Chuy.

2.3. Tratamiento y selección de estaciones meteorológicas

Esta subsección tiene como finalidad describir el proceso de construcción de una base de datos de calidad seleccionada de 8 estaciones que cubre espacialmente toda la costa y que será usada para estudiar el clima de brisas en la siguiente sección. Esto incluye la descripción de las características y particularidades de las estaciones, la razón de su uso o no uso, y en algunos casos el pre-procesamiento realizado.

Seis de las dieciséis estaciones de las que se cuenta con registro no superan el 50% de cobertura con dato. Este factor, así como la distribución espacial homogénea, cercanía a la costa y la similitud en el tipo de estación, fue determinante en la selección para llevar a cabo la totalidad de los análisis (Fig. 2.5). Laguna del Sauce (LGS), si bien supera el 50% de los datos, se descartó de la base seleccionada para mantener la

representatividad espacial, ya que se contaba a su vez con la estación Carrasco (CRR) y Punta del Este (PDE), todas midiendo cercano a 10 metros de altura, en una distancia menor a 150 kilómetros. El mecanismo para la determinación de regiones se detalla en el siguiente capítulo.

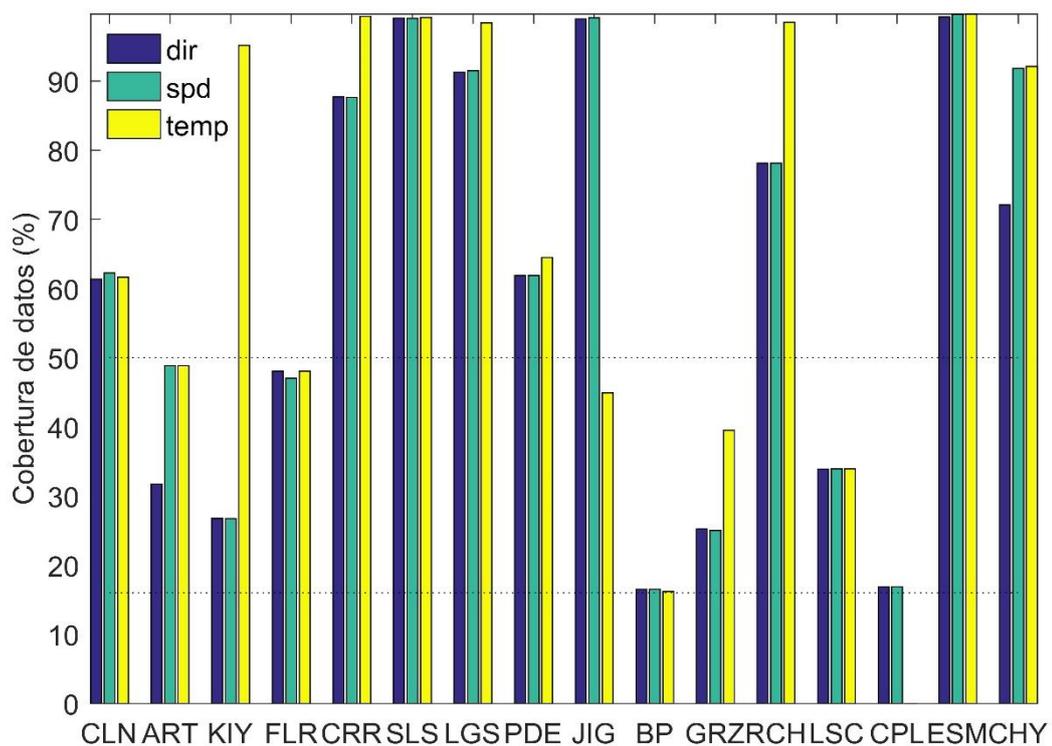


Figura 2.5. Porcentaje de datos que se cuenta con registro según cada variable y cada estación, asumiendo un 100% de 52608 registros por variable con un paso temporal horario entre el 1 de enero de 2011 y el 31 de diciembre de 2016. Las líneas punteadas marcan el límite de registro del 50 % y 16,6% (un año) de cobertura de datos.

Las estaciones de INUMET son convencionales y por lo tanto tienen un horario de trabajo. Las de los aeropuertos de Laguna del Sauce y Carrasco,

y la de Rocha, reportan las 24 horas, Punta del Este trabajó 24 horas hasta julio de 2012 y luego de 06:00 a 18:00 hs. Colonia siempre trabajó de 07:00 a 19:00 hs en el periodo de estudio. Sin embargo, desde noviembre de 2014 se instalaron estaciones automáticas en Colonia y Rocha. El criterio usado en esta tesis fue: el período en el que se tiene datos de una estación automática, se usan esos. De este modo se cuenta con 24 horas en todas las estaciones del INUMET excepto en Punta del Este desde 2012 y en Colonia hasta 2014. La alta correlación en el período de solapamiento entre las convencionales y automáticas en Rocha y Colonia permitió concatenar las series para el estudio de caracterización de brisas, con correlación significativa entre ellas (Figs. 2.6, 2.7 y 2.8). Es de notar que este procedimiento no hubiera sido apropiado para estudiar tendencias o variabilidad interanual. Sin embargo, la media de velocidad de viento de la estación Rocha se sitúa muy por debajo de todas las demás (Tabla 2.2). Si bien es la única del grupo de las que se encuentran cercano a los 10 metros de altura lejos de la costa (27 km), lo cual podría explicar dicha velocidad media, se terminó descartando de la base seleccionada debido a la alta frecuencia de ceros en comparación tanto con las otras estaciones como para el periodo de solapamiento de registros con la estación automática en la misma estación (Fig. 2.8).

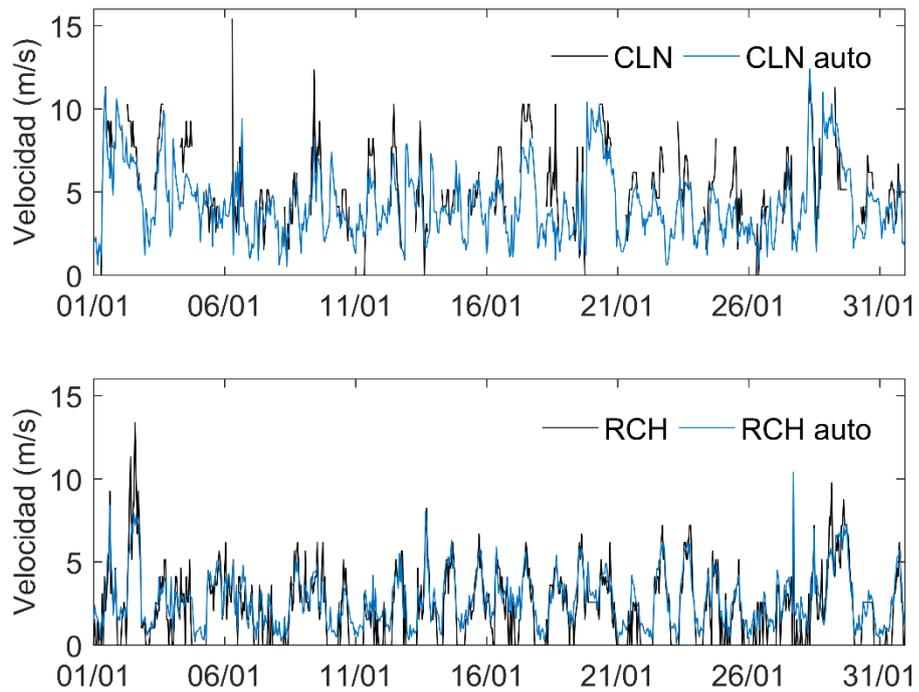


Figura 2.6. Módulo de la velocidad del viento registrada en las estaciones de Colonia (CLN) y Rocha (RCH) en las estaciones convencionales y automáticas (auto) durante enero de 2015.

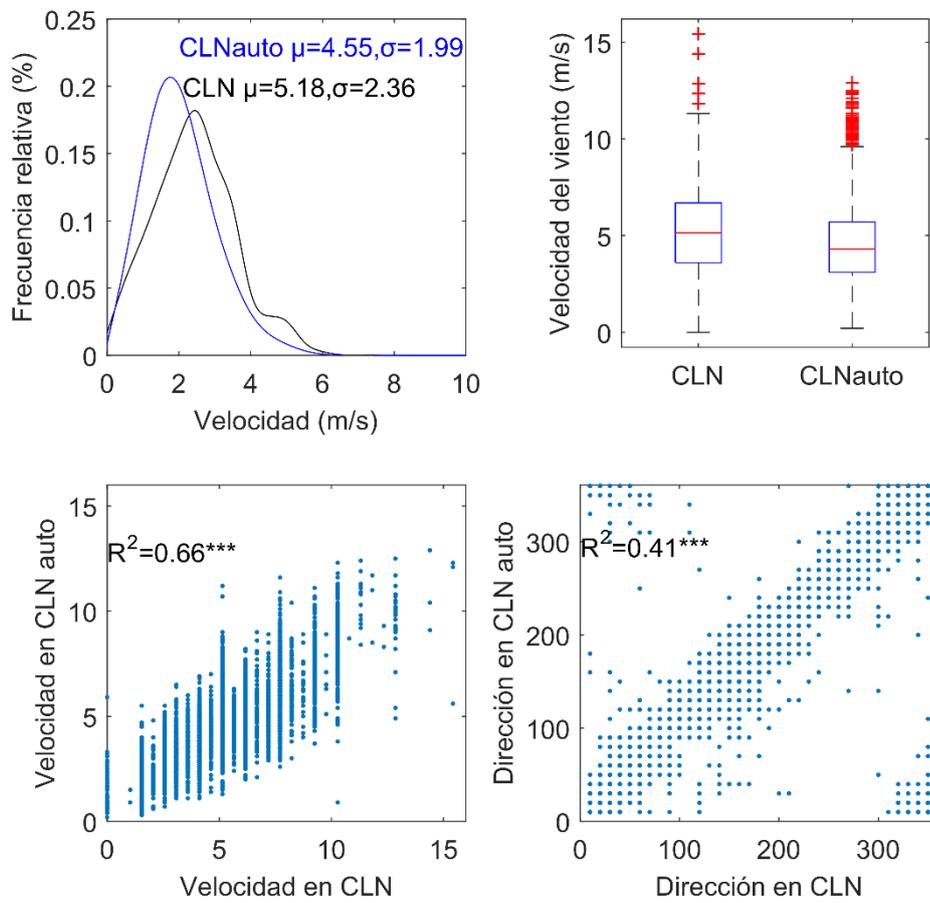


Figura 2.7. Comparación entre registros en Colonia (CLN) en el periodo de solapamiento entre la automática y la convencional. (***) $p < 0,001$; n para dirección=5729 y velocidad= 6197).

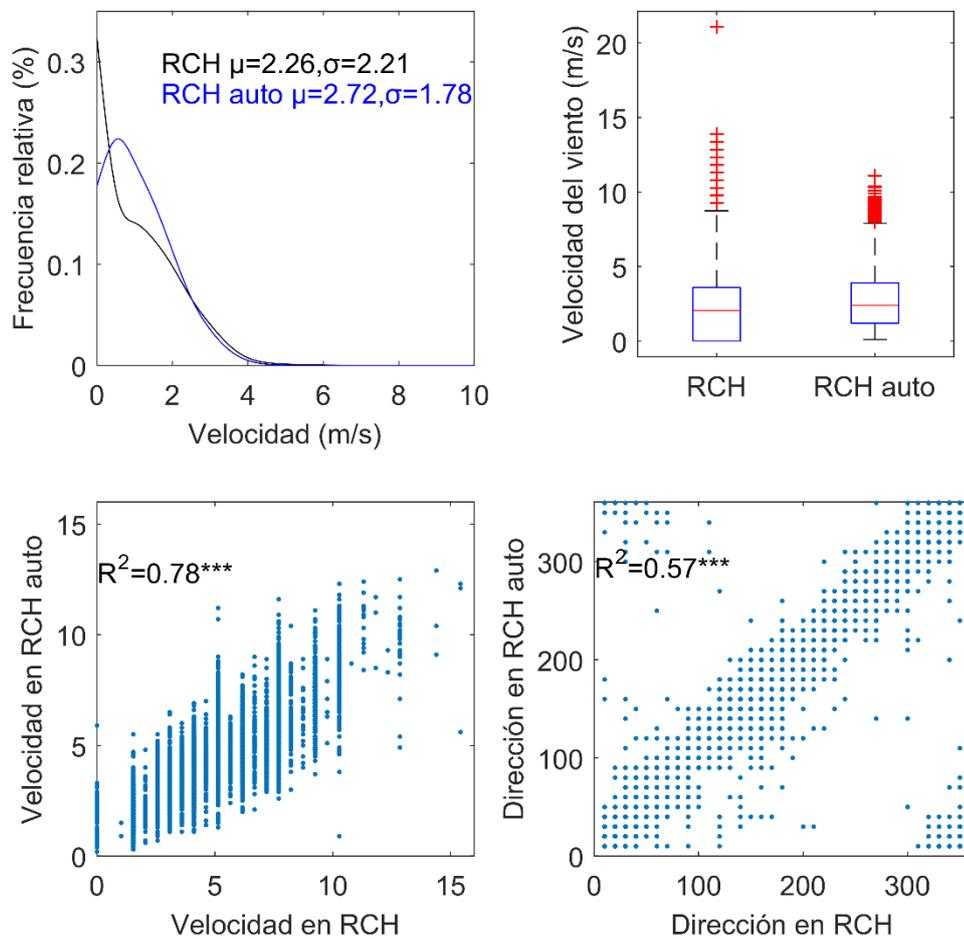


Figura 2.8. Comparación entre registros en Rocha (RCH) en el periodo de solapamiento entre la automática (auto) y la convencional. (***) $p < 0,001$, n para dirección=8187 y velocidad=12493).

Las Garzas (GRZ) mide la dirección en rumbos (cada $22,5^\circ$), eso hace el dato bastante diferente en relación a las otras estaciones que miden cada 10° o menos. A su vez, necesita de una constante conexión a internet para almacenar los datos, por lo que es muy frecuente la ausencia de estos. La boya petrolera de José Ignacio (BP) está configurada para registrar datos cada vez que una variable cambia su magnitud un valor umbral, siendo

dicho umbral específico para cada variable. De todos modos, la frecuencia de registro suele ser siempre menor que 1 hora por lo que no hubo problemas en generar una base con paso temporal horario prácticamente sin ausencia de datos. Por otro lado, la búsqueda de fluctuaciones en la metodología de obtención del dato la convirtió en una serie con mayor variabilidad de alta frecuencia en relación a las otras, aparte de ser la única ubicada en el mar.

Las estaciones seleccionadas fueron aquellas que cumplieron las condiciones de estar significativamente correlacionadas con las de su cercanía y que tienen una amplia cobertura temporal de datos. A su vez, se buscó que estas estaciones tuvieran una distribución relativamente homogénea a lo largo de la costa con el fin de tener una estación de medición de vientos a 10 metros de altura y otra entre 30 y 40 metros de altura representativa de cada región de la costa uruguaya. Con estos criterios las estaciones seleccionadas fueron: CLN, ARKY, CRR, SLS, LGS, JIG, ESM, CHY. ARKY representa la unión de ART y KYU, ya que son las únicas torres con las que se contaba con dato cerca de 30 metros hacia el oeste de Montevideo. Tuvieron la particularidad de que la estación KYU comenzó a funcionar luego de que finalizó ART, por lo que no fue posible compararlas en un período de solapamiento. Sin embargo, ciertos análisis como la caracterización del ciclo diario, agrupación de cluster y porcentaje de días con brisas, que se muestran más adelante, sugieren que presentan un clima de vientos similar. De esta manera se logró tener series

temporales casi completas a 10 y 30-40 metros de altura de 4 regiones de la costa uruguaya con cierta identidad en cuanto al comportamiento de la temperatura del aire y mar y los vientos (Fig. 2.9).

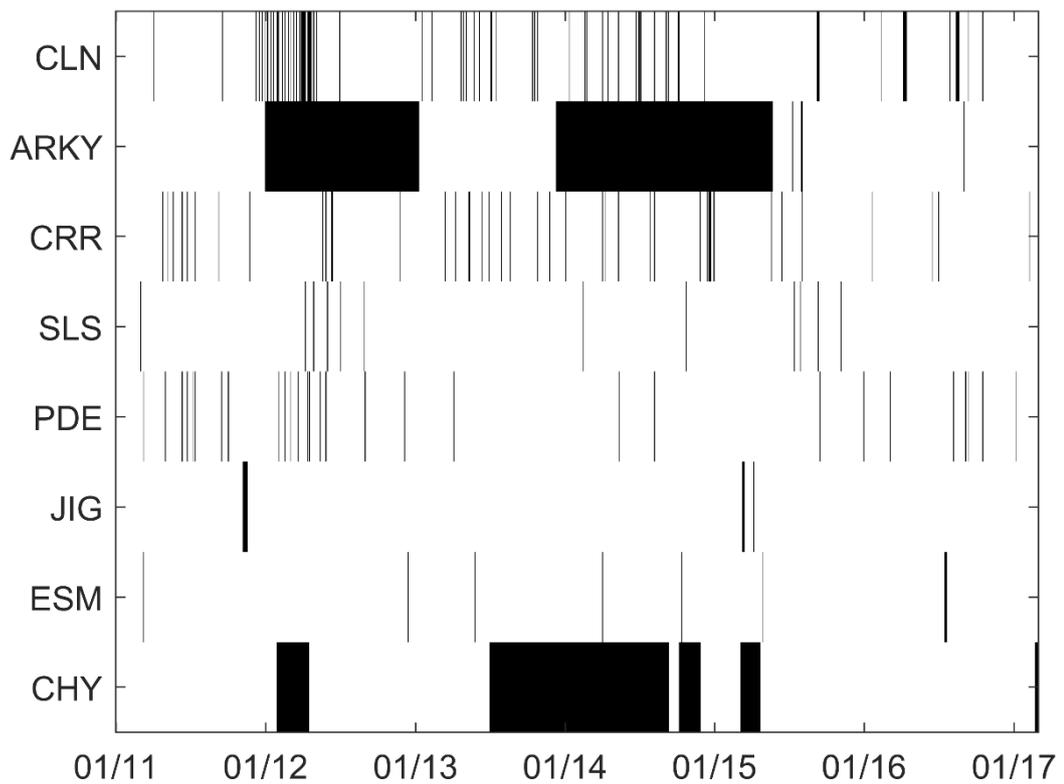


Figura 2.9. Cobertura temporal de datos de la base seleccionada (en blanco) para la velocidad y dirección del viento según cada estación. ARKY es la concatenación de ART hasta 2014 y luego KIY.

2.4. Datos de modelos de circulación global y productos satelitales

Se utilizaron diferentes productos de satélites y reanálisis atmosféricos para complementar las mediciones *in situ*. Estos fueron temperatura de superficie del mar (TSM), para comparar con las escasas mediciones *in situ* y estudiar su relación con la temperatura del aire, y también imágenes de archivo de satélites meteorológicos para explorar la penetración de la nubosidad asociada al frente de brisa. A su vez, se utilizaron reanálisis para estudiar la circulación atmosférica de gran escala asociada al desarrollo de brisa en Uruguay y explorar como reproducen el desarrollo de la brisa marina.

Los productos de satélites utilizados fueron en primer lugar imágenes de archivo de los satélites meteorológicos geoestacionarios GOES-12 y 13 y METEOSAT-10, así como de otros de órbita polar que se descargaron vía la web del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Brasil (INPE) en el siguiente link (<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>). Las imágenes utilizadas fueron las del canal visible de alta resolución. La figura 2.10 muestra un ejemplo utilizado para estudiar la penetración de la nubosidad asociada al frente de brisa.

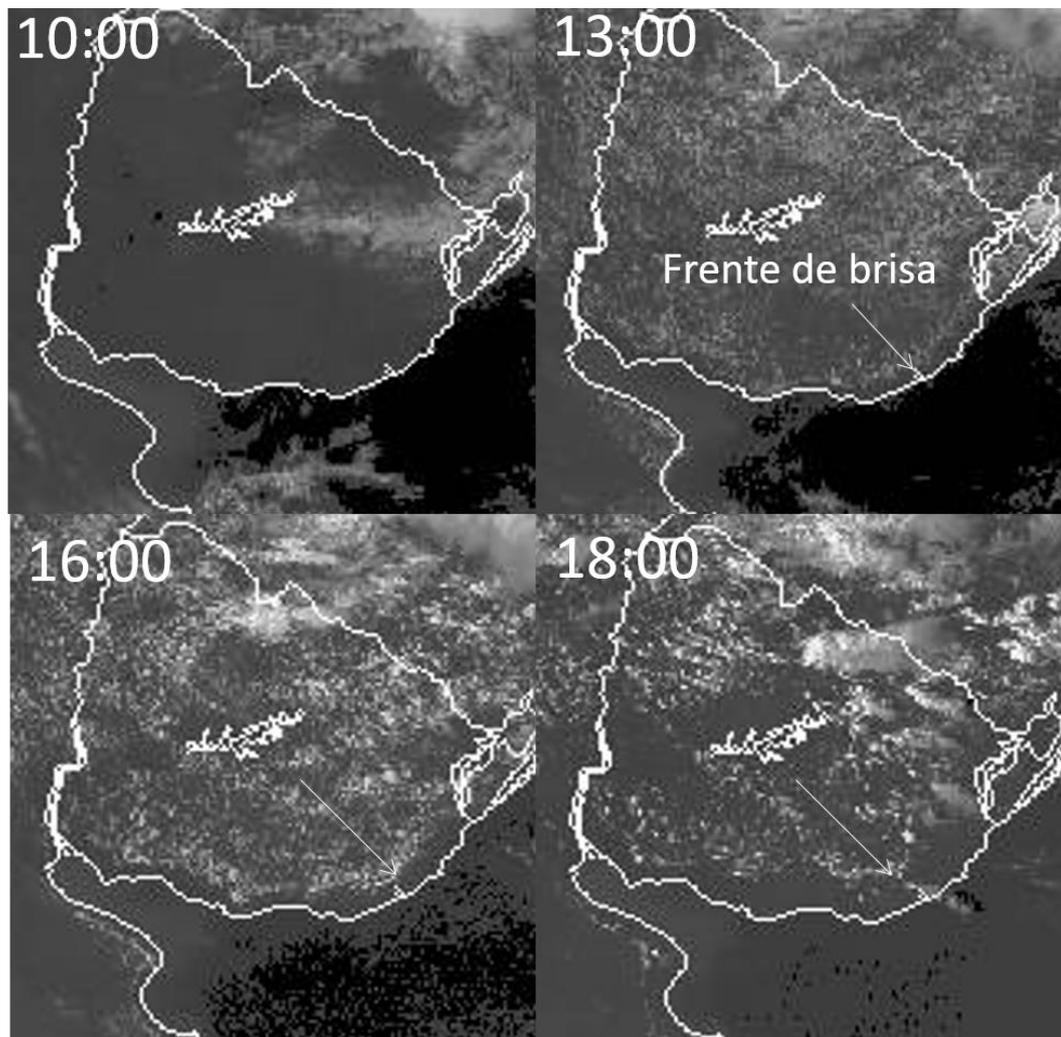


Figura 2.10. Imagen de archivo del satélite GOES 13 para el día 22 de febrero de 2015. Se observa el desarrollo de cúmulos desde el mediodía que penetra tierra adentro en la tarde debido al viento de brisa marina. Sobre las 18:00 (UTC-3) llegan a estar cerca de 50 km tierra adentro, indicado por las flechas.

Para la TSM se utilizó el producto de compilación de satélites de IFREMER con resolución horizontal de $0,1^\circ$ (<http://marine.copernicus.eu/>) y la media de 2 días de GOES-POES con resolución horizontal de $0,05^\circ$

(<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/>). Ambos son datos diarios y presentan ventajas y desventajas: la base de datos de IFREMER es el dato diario medido remotamente pero presenta varias ausencias de datos, mientras que el compuesto de 2 días de GOES-POES es la media móvil que a su vez está interpolada espacial y temporalmente en los lugares donde no fue posible la medición, por lo que las variaciones son menores pero no presenta ausencia de datos. La figura 2.11 muestra los registros de un mes para ambas series satelitales utilizadas en BP así como el dato medido *in situ* en BP y LP. Se observa que el dato satelital tiende a seguir la variabilidad de períodos mayores a un día, y en general, más suavizado y por encima de la media medida *in situ* para LP. Este sesgo positivo se debe a que mide los primeros centímetros de temperatura del mar, los cuales son los que reciben más radiación. Estos centímetros en contacto con el aire a su vez serían aquellos responsables de generar el gradiente para la brisa, quizás teóricamente más representativo incluso que una medida de un CTD ubicado 0,5 metros por debajo de la superficie para no quedar expuesto. Sin embargo, es difícil obtener un dato satelital de TSM con resolución horaria debido principalmente a la frecuente cobertura nubosa que no permite la obtención del dato. Los datos de BP parecerían sobreestimar la TSM, como si el sensor hubiera quedado expuesto al aire. Por otro lado, los datos de LP fueron tomados por el autor y tienen mayor trazabilidad. Estos sesgos y el hecho de no alcanzar la resolución temporal suficiente para captar la variabilidad diaria, hizo del dato satelital de TSM una variable

difícil de implementar en el estudio de la brisa en el día a día, ya sea implementándolo en el índice de brisa o incluso para encontrar relaciones empíricas entre las variables como han hecho otros autores, ya que se maneja un error de magnitud similar a la señal. Sin embargo, resultó muy útil para estudios climatológicos, como se demuestra más adelante, logrando explicar variaciones espaciales en el clima de brisas. La correlación temporal entre el dato medido por satélite e *in situ* en general es alta y siempre significativa en el mismo punto y la cercanía, pero el dato de satélite suele tener menor amplitud de variación (Fig.2.11).

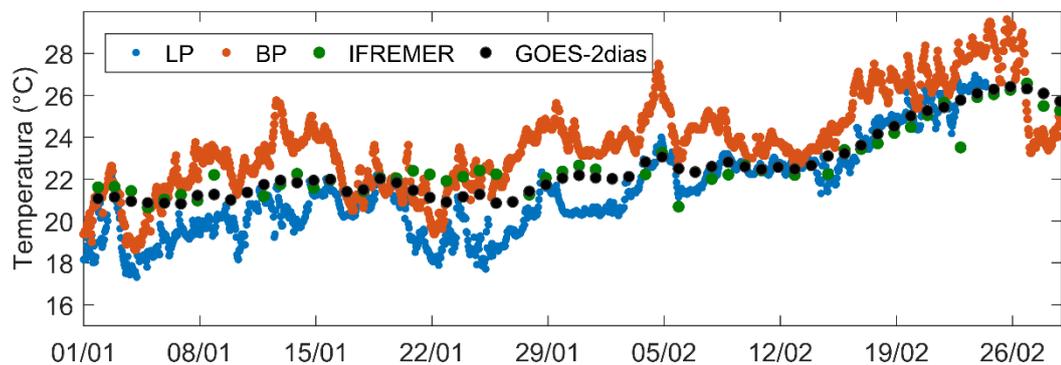


Figura 2.11. Temperatura de superficie del mar durante los meses enero y febrero de 2017 medida *in situ* en la Boya Petrolera (BP) de José Ignacio, La Paloma (LP) y remotamente por los productos satelitales de GOES-POES y el compilado de satélites de IFREMER en un punto intermedio entre BP y LP. Notar que LP y BP tienen resolución horaria y los GOES-POES e IFREMER diaria.

Se utilizó el reanálisis atmosférico ERA-INTERIM (Dee *et al.*, 2011), y salidas del modelo Global Forecast System (GFS, Saha *et al.*, 2010). En el caso de ERA-INTERIM se utilizó siempre el análisis cada 6 horas. Para todo el Atlántico Sudoccidental (ASO) se descargó el campo de presión en superficie del mar con resolución horizontal de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ y para enfocar sobre Uruguay se consideró una mayor resolución de $0,125^{\circ} \times 0,125^{\circ}$, incluyendo a su vez los campos de viento y temperatura. También se utilizaron los vientos del análisis del GFS con resolución horizontal de 27 kilómetros y temporal de 3 horas en puntos específicos de la costa para evaluar si reproduce la brisa. En la sección 5.1 se evalúa el índice de brisa en un punto observado y el mismo punto en los modelos, si bien no fue el objetivo central de esta tesis. Básicamente ERA-INTERIM no la reproduce y el GFS sí lo hace, aunque la resolución espacio-temporal limita la capacidad del análisis. No se exploró el Weather Research and Forecasting Model (WRF), modelo de mesoescala, si bien éste con seguridad podría mejorar la representación de la brisa. La razón por la que no se utilizó es que en su implementación el modelo requiere elegir un conjunto de parametrizaciones físicas que depende de la región de estudio, lo cual requiere un proceso de validación y costos computacionales muy elevados que merece una tesis en sí misma (ej. Steele *et al.*, 2015; Salvador *et al.*, 2016).

2.5. Consideraciones sobre el procesamiento de datos

Se reunieron datos de 16 estaciones meteorológicas entre 2011 y 2017 y en una base de datos consistente.

Se compararon las mediciones de estaciones convencionales con automáticas. Los valores intermedios los cuales tienden a observarse durante la brisa marina son los que están mayormente correlacionados. La estación convencional tiende a medir mayor cantidad de valores extremos de viento y cantidad de 0s.

Se colectaron su vez datos de temperatura de superficie del mar y se compararon con mediciones satelitales, lo cual sugiere que presentan utilidad para estudiar fenómenos de frecuencia menor a 2 días.

Como comentario, se hace notar la conveniencia de utilizar los sistemas de medición continuo de otros organismos estatales para generar datos de calidad y representatividad suficiente para estudios oceanográficos de micro y mesoescala.

3. ÁREA DE ESTUDIO: DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMATOLÓGICA

Ubicada en el margen oriental de Sudamérica entre los 33 y 35°S, la zona de posible influencia de la brisa en la costa uruguaya (40-80 km tierra adentro desde la costa) presenta un relieve bajo. La mayor parte de Colonia, San José, Montevideo y Rocha no supera los 100 metros de altitud y están más bien cubiertos por vegetación y abundan los humedales o áreas urbanas. Los puntos más altos cerca de la costa se observan en Maldonado en los cerros de Piriápolis debido a la influencia de la Cuchilla grande. También se observan altitudes de entre 100 y 500 metros a lo largo de Maldonado y Rocha casi paralelo a la costa atlántica a unos 50 km de la costa. En este sector justamente se ubica el Parque Eólico Sierra de Caracoles, cuando el aire es obligado a ascender y este se vuelve más intenso. La costa propiamente dicha, presenta orientación SSO desde Conchillas en Colonia hasta Punta del Este, SE desde Punta del Este a Cabo Polonio y ENE desde Cabo Polonio a Brasil, de modo que tanto sus características oceanográficas como su orientación permiten discriminar entre la costa platense y la atlántica.

Entre Punta del Este y las costas de Canelones se encuentra el límite del estuario el cual es más bien dinámico^V, aunque como regla general se toma como límite de separación la península de Punta del Este. A los efectos de esta tesis, se conservaron dichos límites históricos. El *swell* predominante es del SE y la batimetría es mayor en la costa atlántica, de modo que el oleaje es más intenso (Alonso, 2012). La deriva litoral a modo general es hacia el NE y SO al E y O de Cabo Polonio en la costa atlántica, respectivamente. En la costa atlántica y gran parte de la platense, predominan los arcos de playas entre puntas rocosas, con una playa “brava” con características disipativas hacia el E y una “mansa” con características reflectivas hacia el O^{VI} (Panario y Gutiérrez, 2006). Se destacan también en la costa atlántica las lagunas costeras, generadas por el retroceso del mar desde el Holoceno, comenzando con la Laguna del

^V Históricamente se ha tomado a Punta del Este como el límite exterior del Río de la Plata de modo de obtener los beneficios jurídicos que otorga un Río, a pesar de ser este un estuario y poseer un límite dinámico que pocas veces alcanza Punta del Este. Una buena aproximación sería la isohalina de 25.

^{VI} El abrigo de la brisa marina y la posibilidad de contemplar el atardecer en el mar históricamente llevó a las playas al oeste de los cabos atlánticos a ser las preferidas por los turistas, como La mansa en Punta del Este, El Barco en La Pedrera Los Botes y la Balconada en La Paloma, La Sur en Cabo Polonio y La Viuda en Punta del Diablo. Si bien la brisa marina tiene una escala mayor y por lo tanto sucede también en esas playas, la orientación hace que el camino que experimente el flujo sea a través de médanos y construcciones, haciéndolo mucho más turbulento y menos intenso. A su vez, estas playas suelen tener características reflectivas, con una gran pendiente haciendo un efecto pozo de aire de modo que a nivel de arena casi no hay viento. Hay varias publicaciones científicas y libros de texto sobre la historia de los balnearios de la costa uruguaya y la geomorfología costera. (ej. El libro de la costa e Islas y cabos atlánticos del Uruguay).

Diario en Maldonado, tendiendo a ser cada vez más grandes y separadas de la costa hasta la Laguna Merín en el límite con Brasil, y luego en territorio brasilero hasta la Laguna de los Patos (Gómez-Pivel, 2006; Panario y Gutiérrez, 2006).

3.1. Clima de vientos en la costa uruguaya

Los vientos en la costa uruguaya predominan del primer cuadrante (N-E) durante todo el año, siendo en primavera-verano más frecuentes que en otoño–invierno, cuando los vientos del 2^{do} y 3^{er} cuadrante (SO) son de frecuencia similar a los del 1^{ero}. Esto se debe principalmente a la migración estacional del anticiclón semipermanente del Atlántico sur (Peterson y Stramma, 1991). Octubre-Noviembre-Diciembre (OND) es el trimestre más ventoso con una media de 5,2 m.s⁻¹ mientras que Abril-Mayo-Junio (AMJ) es el menor con 4,6 m.s⁻¹, siendo la media total de 4,9 m.s⁻¹ (Tabla 3.1). Esto es consistente con el análisis de Alonso (2012) que utilizó 5 estaciones costeras, siendo CRR la única en común. En las rosas de viento de las estaciones, se observa que en casi todas predominan los vientos del NE, y quizás el patrón que se puede observar es que cuanto más hacia el océano, tanto en el eje W-E (ART a CHY) como en el eje *across-shore* (ej. De FLR a BP) tiende a aumentar la frecuencia de los vientos del E, o sea los que vienen desde el mar (Fig. 3.1).

Tabla 3.1. Módulo de la velocidad media de viento (Vel, m.s⁻¹) y la moda de la dirección por cuadrante (Cdte) por estación y por trimestre, así como el acumulado anual y por estación.

Estación	EFM		AMJ		JAS		OND		ANUAL	
	Vel.	Cdte.								
CLN	4,9	2	4,3	2	4,9	2	5,2	2	4,8	2
ART	5,2	1	4,8	1	5,5	1	5,4	1	5,3	1
KIY	5,4	1	5,0	2	5,5	1	5,8	1	5,5	1
FLR	5,3	1	5,2	1	6,0	1	5,7	1	5,6	1
CRR	4,1	2	3,4	2	4,0	2	4,3	2	3,9	2
SLS	5,2	1	4,9	1	5,4	1	5,6	1	5,3	1
LGS	4,5	1	4,0	1	4,6	1	4,8	1	4,5	1
PDE	4,7	2	4,8	1	5,1	1	5,0	1	4,9	1
JIG	4,7	1	4,4	4	4,7	1	4,8	1	4,6	1
BP	6,1	2	7,4	2	6,0	3	6,4	2	6,4	2
GRZ	4,1	1	3,7	4	4,1	4	4,3	1	4,0	1-4
RCH	3,2	1	3,0	3	3,5	3	3,6	1	3,3	1-3
LSC	4,8	2	4,6	3	5,1	2	5,5	1	5,0	1
CPL	5,6	1	5,7	3	5,6	3	5,9	1	5,7	1-3
ESM	4,5	1	4,1	1	4,7	1	4,8	1	4,5	1
CHY	5,2	1	4,5	4	5,0	3	5,3	1	5,0	1
TOTAL	4,8	1	4,6	1	5,0	1	5,2	1	4,9	1

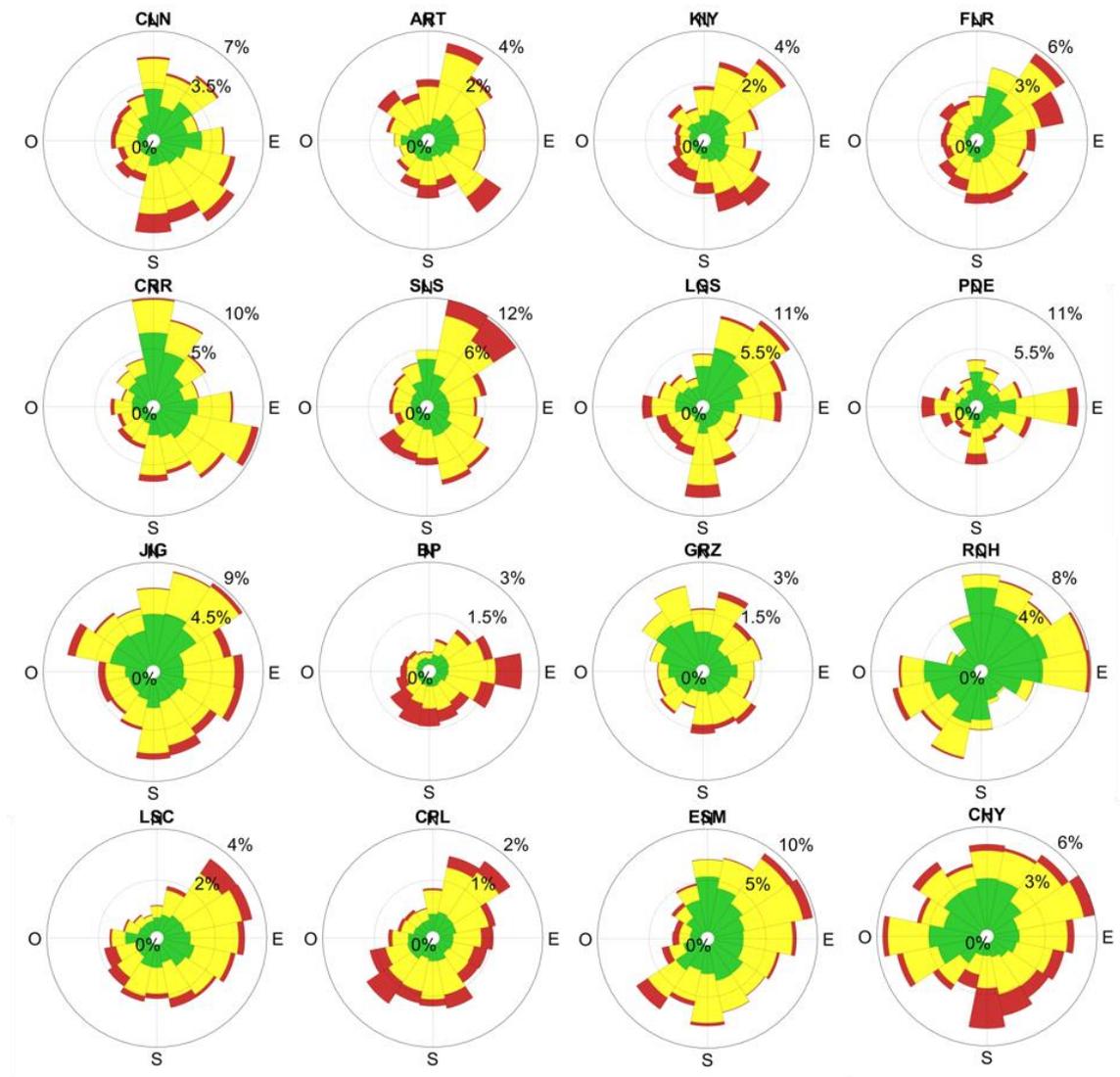


Figura 3.1. Rosa de vientos correspondiente a cada estación. Los límites de colores representan la intensidad: en verde, hasta 4 m/s, en amarillo entre 4 y 8 m/s, y rojo mayor a 8 m.s⁻¹.

El ciclo diario de vientos, calculado como el promedio de todos los registros por estación y por hora, muestra que predominan los vientos de tierra en la mañana y desde el mar en la tarde para todas las estaciones excepto BP, que es la Boya Petrolera que se encuentra a 4 km de la costa donde

siempre vienen del 2^{do} cuadrante. Es interesante observar que desde Colonia (CLN) hasta Laguna del Sauce (LGS) el viento tiende a ser más del S que del E en la tarde mientras que desde Punta del Este (PDE) hasta el Chuy el viento tiende a ser más del E que del S. Esto puede estar estrechamente vinculado a la orientación de la costa y el fenómeno de brisa marina. Mientras que en el estuario la componente *across-shore* tiende a cruzar el eje N-S en el océano tiende a ser SE-NO y hasta casi E-O en el límite con Brasil (Fig. 3.2). También se observa que las estaciones del O que miden cercano a los 30m de altura tienden a tener vientos de tierra en la mañana prácticamente de la misma magnitud que en la tarde. Esto fue tenido en cuenta en la implementación del índice de identificación de brisas en el siguiente capítulo.

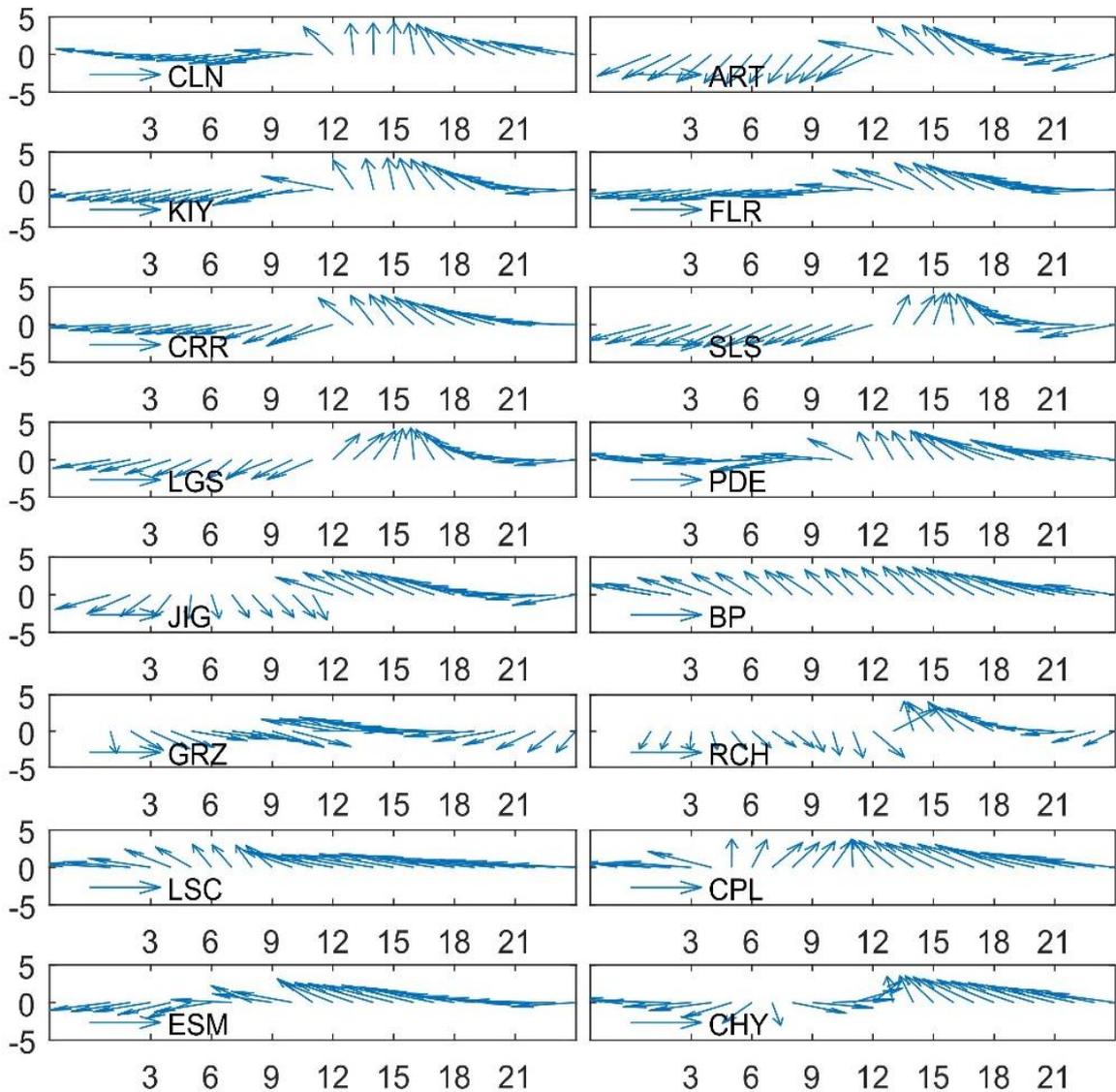


Figura 3.2. Ciclo diario de vientos ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) en todas las estaciones. Los vectores representan el promedio de u y v para cada hora con registro. El eje y representa el promedio de la velocidad (vectorial) y el x la hora del día.

A modo descriptivo, se muestran las rosas, rosas fuertes (aquellas con velocidad mayor a $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y el ciclo diario de la componente *across-shore* y *along-shore* por trimestre en JIG. Los vientos predominan del NE durante

casi todo el año, en especial en primavera-verano, donde también son frecuentes los vientos del E y SE. Otoño es la estación con menor intensidad media del viento y con predominancia del NO. En invierno son más frecuentes los vientos del S y SO en relación a las otras estaciones (Fig. 3.3). Los vientos fuertes mayores a $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ representan menos del 3% de los datos, pero suelen tener particular interés ya que producen altos impactos en la costa. Verano es la estación con estos eventos menos frecuentes y menos intensos con dirección principalmente del SE, mientras que invierno y primavera concentran los eventos más intensos y frecuente con predominancia del O, SE y SO respectivamente (Fig. 3.4). El ciclo diario de vientos muestra una rotación *on-shore* hacia la tarde probablemente debido al componente de brisa. A su vez existe una componente *along-shore* que tiende a venir del NE durante primavera-verano y más del SO en otoño-invierno (Fig. 3.5). Por último, se muestra el ciclo diario de presión, radiación, temperatura y vientos normalizados. Se observa que los vientos, temperatura y radiación tienen un ciclo por día, mientras que la presión en superficie muestra dos ciclos, probablemente asociado a la marea barométrica^{VII} (Fig. 3.6). La marea barométrica en la región presenta una

^{VII} El calentamiento de la atmósfera debido a la radiación solar combinado con los procesos turbulentos de calentamiento desde el suelo, generan ondas de gravedad internas con períodos diurno y semidiurno. Estas ondas, causan oscilaciones regulares en los campos de viento, temperatura y presión, las cuales se conocen como mareas en la atmósfera, que para el caso de la presión recibe el nombre de marea barométrica. La amplitud de la marea barométrica crece hacia el verano y menores latitudes, y es más clara los días de cielo claro y "buen tiempo" (Dai y Wang, 1999; Possia *et al.*, 2014).

variación diaria de 2 hPa de acuerdo a Possia y colaboradores (2014) en Gualeguaychú, aunque pueden observarse variaciones según la localidad.

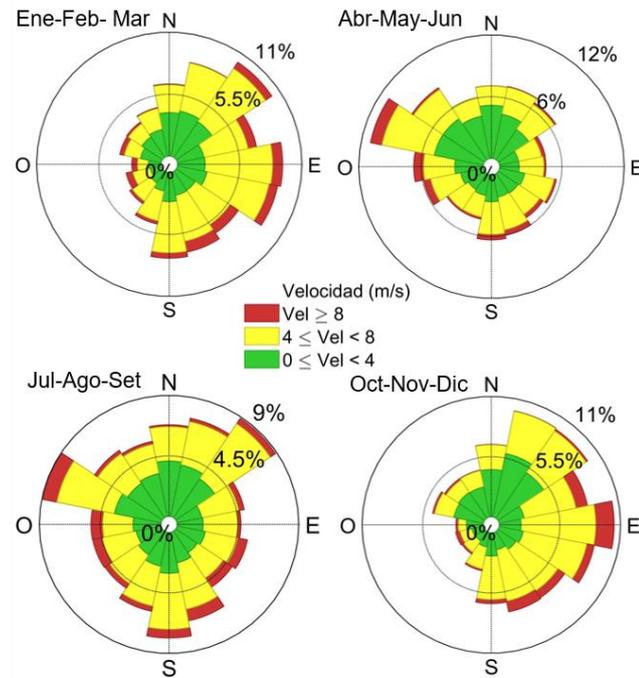


Figura 3.3. Rosa de vientos por trimestre en la estación de José Ignacio.

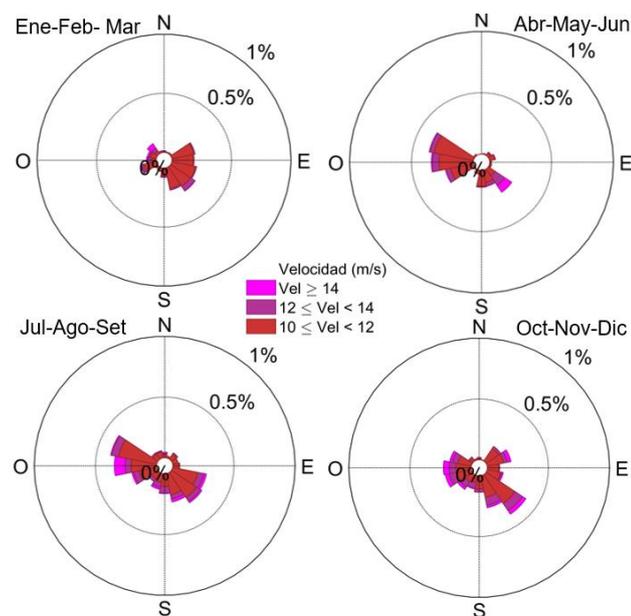


Figura 3.4. Rosa de vientos fuertes por trimestre en la estación de José Ignacio.

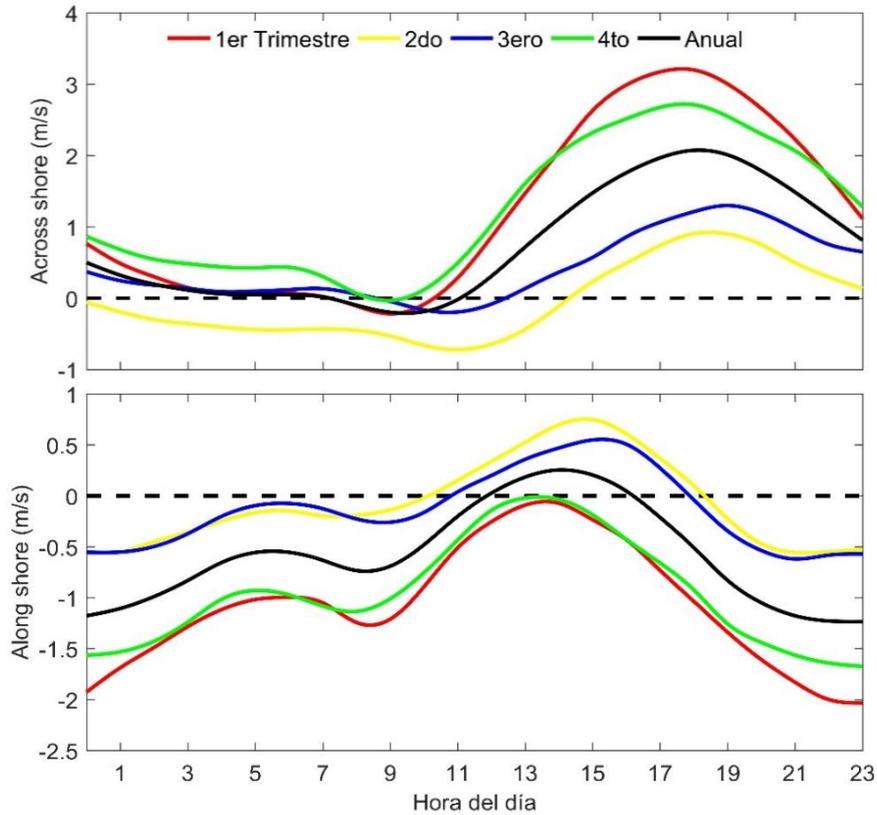


Figura 3.5. Ciclo diario de velocidad de viento perpendicular (arriba) y paralelo a la costa (abajo), por trimestre y media anual en José Ignacio.

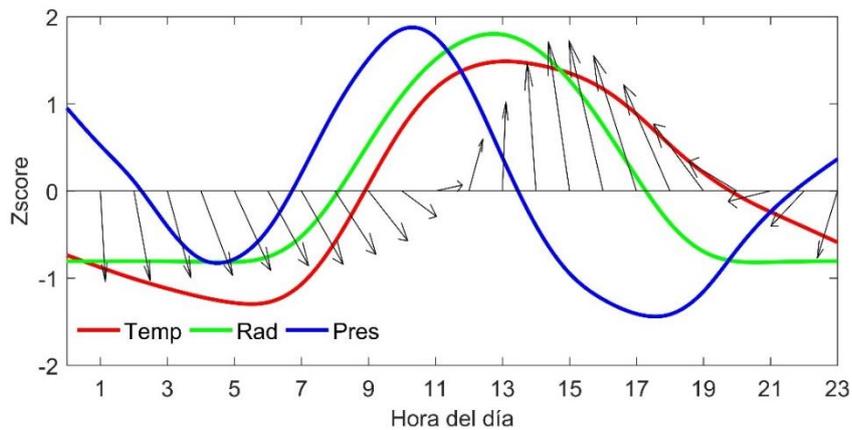


Figura 3.6. Ciclo diario normalizado (Zscore, llevados a media 0 y desvío estándar 1) de vientos, temperatura, radiación y presión. Todos los datos

pertenecen a José Ignacio, excepto la presión la cual se midió en Las Garzas.

3.2. Clima de temperatura de superficie del aire y del mar en Uruguay

Dado que el generador de la brisa es el gradiente de presión consecuencia de la diferencia entre la temperatura del aire y mar, y que a su vez estas variables presentan alta autocorrelación espacial, el primer paso fue estudiar el clima de diferencia entre la temperatura media del aire menos la media del agua (ΔT) en la costa uruguaya. El ciclo diario de temperatura del aire y mar en el estuario y en el océano muestra que desde las 9-10 am hasta cerca de las 18:00 la temperatura del aire supera a la del mar (Fig. 3.7). La amplitud del ciclo diario de temperatura del mar y del aire en la Boya Petrolera (ubicada en el océano a 4 km de la costa) es 0,6°C y 5°C respectivamente. Para Montevideo, a pocos metros de la costa, el ciclo diario de temperatura es de 0,7°C y 7°C para el agua y aire respectivamente.

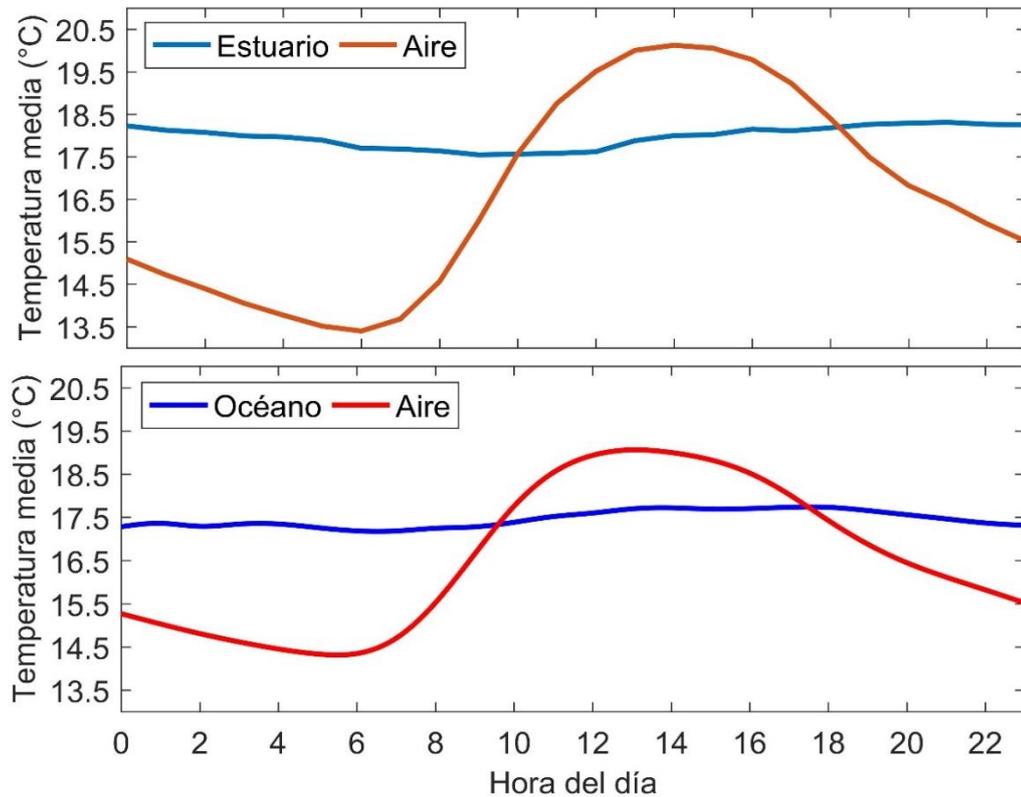


Figura 3.7. Ciclo diario de temperatura del aire y mar medidos en MV y CRR (arriba) y BP y JIG (debajo). En MV agosto se debió interpolar porque no se contaba con dato. El periodo de registro es setiembre 2014 a julio 2015. BP el periodo de registro es el 2016.

Climatológicamente, la costa uruguaya presenta un ciclo anual con una gran amplitud térmica tanto del aire como del mar debido a su ubicación en latitudes medias. A su vez, la influencia de las corrientes de contorno oeste y el Río de la Plata proponen un marco singular para el ciclo anual de TSM. El Río de la Plata distingue una región estuarial menos profunda y por lo tanto más en fase con el ciclo estacional de la atmósfera debido a los cambios de temperatura por flujos de calor y aportes continentales, y una región oceánica, con un desfase típico de 1-2 meses. El límite entre estas

regiones es dinámico, se ubica entre Montevideo y Maldonado y depende principalmente del régimen de precipitaciones y vientos (Guerrero *et al.*, 1997). La figura 3.8 muestra la primera y segunda función ortogonal empírica (EOF) del promedio mensual de TSM en el área de estudio utilizando los datos diarios de GOES entre 2012 y 2017 y explica el 98% de la varianza. El primer EOF distingue 2 grandes regiones, la del estuario, la cual tiende a estar más cálida, y la del océano. El límite se encuentra entre MV y SLS. Las temperaturas máximas y mínimas en el estuario y océano son de 25 y 22 °C y 14,4 y 12 °C en enero-febrero y julio-agosto, respectivamente. A su vez en estas regiones contra la costa se observan zonas donde este comportamiento se acentúa. El segundo EOF explica el 2% de la varianza y está relacionado con el (des)acoplamiento del (océano) estuario debido a las diferencias de profundidad entre el estuario y océano mencionadas anteriormente. La suma de los otros EOFs no llega a explicar el 0,5% de la varianza. La ventaja del análisis EOF o también llamado análisis de componentes principales es que proporciona una descripción condensada de la variabilidad espacio-temporal de una región. El desarrollo matemático puede leerse Emery y Thomson (2001, pág. 319).

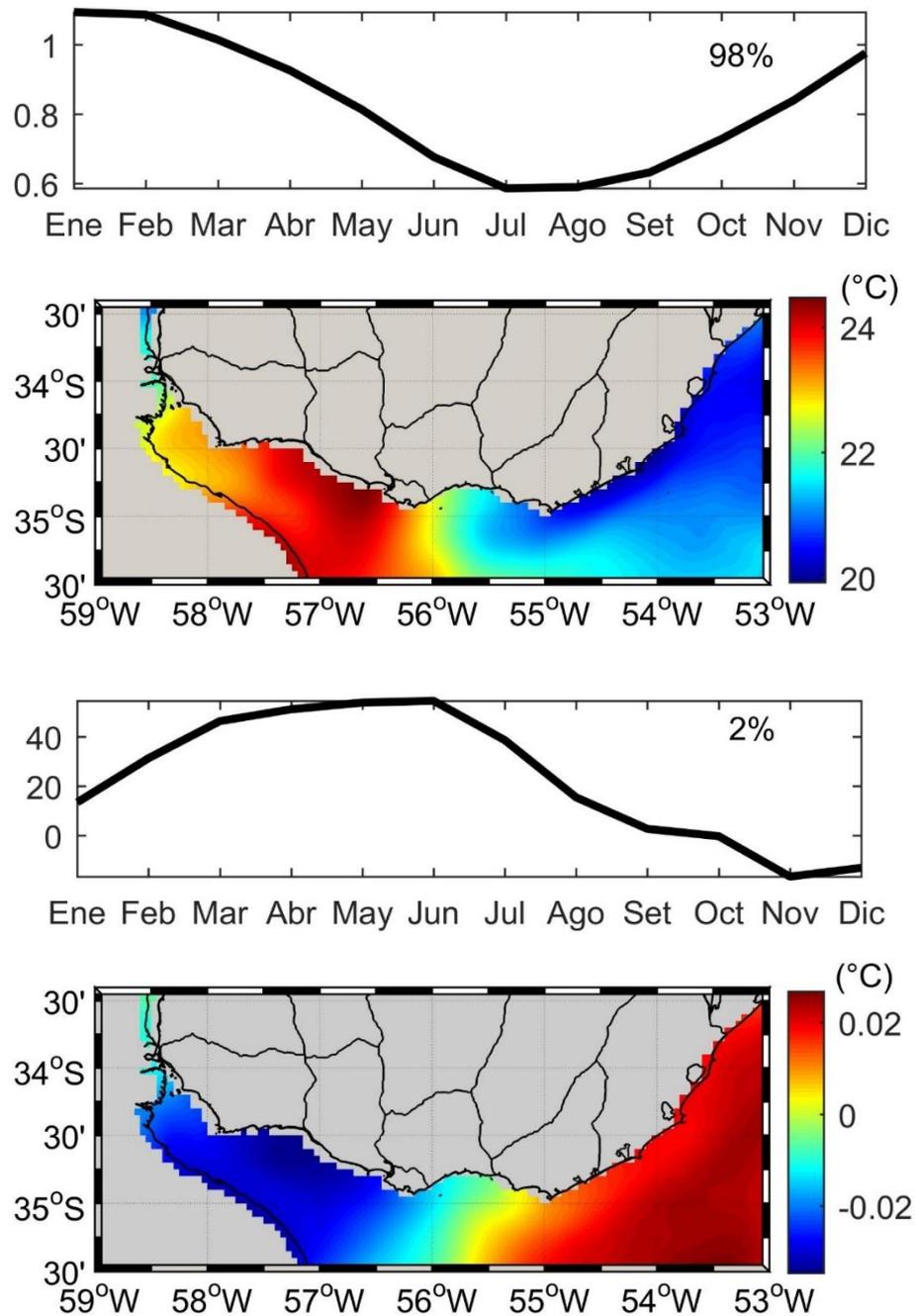


Figura 3.8. De arriba hacia abajo: componente principal 1 (PC1), función ortogonal empírica 1 (EOF1), PC2 y EOF2 para la climatología de temperatura de superficie del mar utilizando datos diarios de GOES entre 2012 y 2017 (98% y 2% de varianza explicada respectivamente).

La climatología de la temperatura del aire (la media, máxima y mínima), y de la TSM en un punto en el estuario y otro en el océano, si bien pierde representatividad espacial, permite identificar más diferencias. En primer lugar, si bien el océano tiende siempre a estar más frío, los meses de más frío en la atmósfera (jul-ago.) el estuario lo está más que el océano (Fig. 3.9). Este siempre tiende a estar más acoplado con la atmósfera y tener temperaturas más extremas, tanto en verano como en invierno. El océano tiene menor amplitud térmica y está entre 1 y 2 meses desfasado con respecto al estuario. Durante los meses de abril, mayo y junio en el océano la temperatura máxima del aire es similar a la media de TSM. Por lo tanto, durante estos meses es esperable una menor frecuencia de brisas en esta región con respecto al estuario. Climatológicamente todo el año se puede dar el fenómeno de brisa en el estuario y en el océano, ya que la máxima siempre supera a la media de TSM. El desfasaje del océano está estrechamente vinculada con la varianza explicada en el segundo EOF en la figura 3.8.

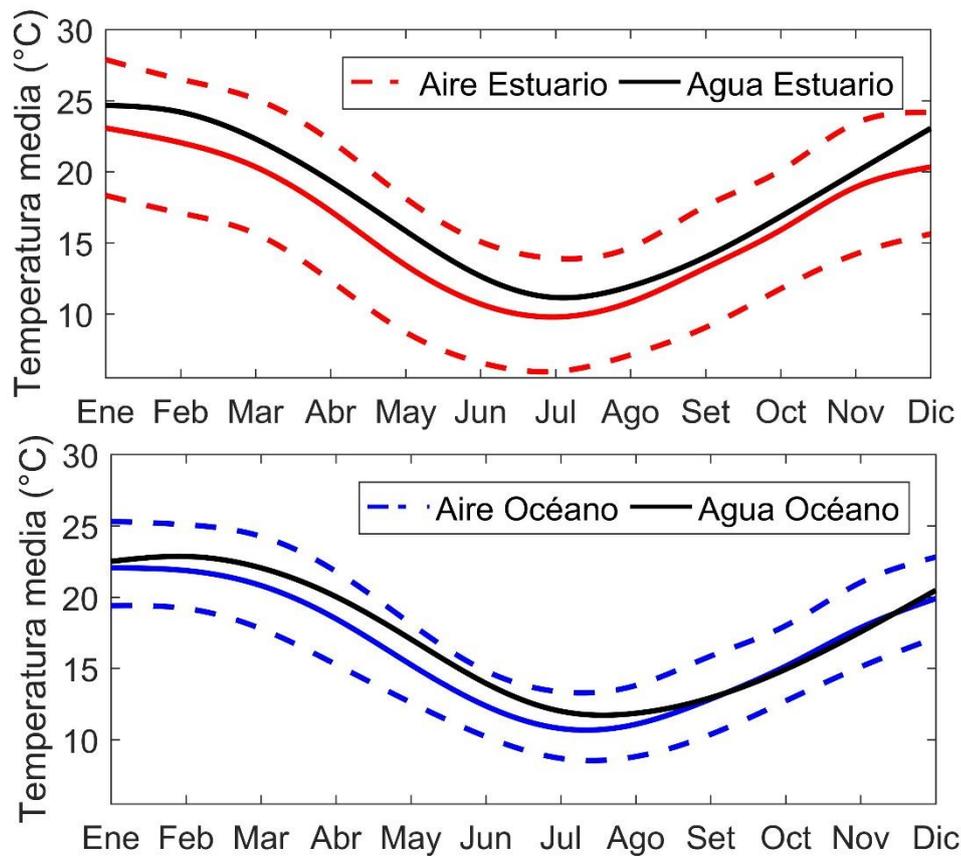


Figura 3.9. Media mensual de temperatura, media diaria del aire, máxima y mínima punteada y media de temperatura de superficie del mar. Arriba se muestra para el estuario y abajo para el océano. Los datos corresponden al año 2011, único en que se contaba con registros 24 horas a 2 metros de altura tanto en Carrasco como en Punta del Este. Los datos de TSM son de satélite IFREMER.

3.3. Regionalización de la costa uruguaya según el ciclo diario de vientos y climatología de temperatura del aire y mar

El objetivo de esta sección fue en primer lugar identificar regiones de comportamiento similar a lo largo de la costa uruguaya para las variables relacionadas con el desarrollo de la brisa marina, siendo estas viento (módulo de velocidad y vectores u , v), temperatura del aire y del mar. El segundo objetivo fue una vez seleccionadas las regiones, identificar aquellas estaciones más representativas de cada región en base a la correlación con las estaciones de su región, asumiendo que existe autocorrelación espacial de las variables de viento y temperatura y que de encontrarse grandes diferencias entre estaciones cercanas estas probablemente se deban a factores vinculados a la toma del dato o a la geografía local.

El método para identificar las regiones de comportamiento similar fue el análisis de agrupamiento (cluster) utilizando el método de varianza mínima de Ward. Este método es jerárquico y aglomerativo, de modo que comienza con n grupos de un solo individuo y aglomera dos grupos en cada paso, hasta que todos los individuos se fusionan en un único grupo después de $n-1$ pasos. El criterio para elegir qué par de grupos aglomerar en cada paso es aquel que minimiza la suma de las distancias cuadradas entre los

individuos y los centroides de sus respectivos grupos, sumados a los grupos resultantes de la siguiente manera:

$$W = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \|x_i - \bar{x}_g\|^2 = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^K (x_{i,k} - \bar{x}_{g,k})^2 \quad (3.1)$$

Donde W es el valor que se busca sea mínimo, g los grupos, n los individuos, x el atributo y k la dimensión. Para seleccionar el menor valor de W este es calculado para todos los posibles pares de grupos $G(G + 1)/2$ en cada paso de aglomeración (Wilks, 2011).

Los individuos a agrupar fueron las estaciones meteorológicas en base a los atributos de módulo de velocidad de viento, vectores u y v , y temperatura del aire. Para el caso de la TSM, los individuos a agrupar fueron los píxeles con dato en el área de estudio.

Se realizó un análisis de cluster para cada uno de los atributos. En el caso de los cluster de módulo de velocidad de viento y temperatura del aire se utilizó como atributo la matriz de correlación de Pearson entre las estaciones con el fin de estandarizar las diferencias en la amplitud de variación asociadas a las diferencias de altura de registro (la temperatura varía menos y el módulo del viento más en las estaciones que miden a 30-40 m con respecto a las que miden a 10 m). Se tomaron únicamente los datos en que todas tuvieron registro en simultáneo.

Para observar los niveles jerárquicos, los cluster se presentan en forma de dendrograma cuando se trabajó con series temporales y en mapas secuenciales de colores asociados a cada aglomerado para la TSM donde los individuos a agrupar (píxeles con dato) eran cientos.

El dendrograma en la figura 3.10 muestra la agrupación de las estaciones de acuerdo al valor de correlación entre ellas para la temperatura del aire durante el período de solapamiento. Se observa que la agrupación sigue un patrón de distancia entre las estaciones en el eje *along-shore*. Se dividen en 2 grandes clusters, claramente caracterizando uno la región del estuario y otro la oceánica, que a su vez se subdividen en subgrupos. Uno de los grandes clusters se divide en estaciones del estuario interno, del estuario externo y Kiyú (KIY) por separado, mientras que el cluster oceánico se subdivide en un grupo desde Punta del Este (PDE) a Las Garzas (GRZ), y otro con Esmeralda (ESM) y Chuy (CHY).

El dendrograma según la velocidad del viento distingue a las estaciones del O de todas las demás en primer lugar, siendo estas Colonia (CLN) y la combinación de Artilleros y Kiyú (ARKY). Luego le siguen 2 clusters, uno compuesto por Rocha (RCH) y Chuy (CHY), donde la velocidad media en estas estaciones suele ser menor que las demás, y el otro cluster se subdivide en 2 subgrupos donde se observa nuevamente la segregación O-E con un quiebre entre el estuario y el océano (Fig. 3.11).

Por otro lado, el dendrograma según el ciclo diario de vientos también sigue el patrón de segregación O-E, aunque merece aún más aclaraciones. Punta

del Este, Chuy y Cabo Polonio (PDE, CHY y CPL) se agrupan muy cercano debido a que tienen un comportamiento de vientos de cabo, en donde el viento de tierra del 1^{er} y 4^{to} cuadrante es menos frecuente. El fenómeno inverso se da en la Boya Petrolera (BP), aún más acentuado, debido a que se ubica 4 km dentro del mar. Esto sugiere que el eje *across-shore* es más determinante en el ciclo diario que el *along-shore*, donde aun así se observa la diferenciación en el eje O-E (*along-shore*) con una partición entre el estuario y el océano. (Fig. 3.12). Se observa también que las estaciones que miden a mayor altura, tienden a tener mayor correlación espacial. Esto se debe a que con la altura tienden a perderse los efectos locales por la fricción con la orografía.

Por último, el análisis para la TSM que se presenta en forma de mapas muestra una primera partición (técnicamente la última según el método) entre el estuario y el océano a la altura de la Barra del Indio, definida por un escalón en dicha región en una isóbata de aproximadamente 10-15 metros. Hacia el O y E de la Barra del Indio la profundidad disminuye y aumenta, respectivamente. Esto provoca que la región del estuario tenga una relación área/profundidad muy grande, y en consecuencia el intercambio de calor con la atmósfera permita variaciones importantes de temperatura en la columna de agua resultando en un acoplamiento más rápido con los cambios de temperatura en la atmósfera. Por otro lado, la región oceánica es más profunda y tiene la inercia térmica característica que provoca un desfase de 1-2 meses en la climatología, como se veía

anteriormente en este capítulo. Es interesante a su vez observar el comportamiento de la región definida entre San Luis (SLS) y Punta del Este (PDE). Esta región de transición, si bien la orientación de la costa y el ciclo diario de vientos son muy parecidos con las estaciones del O, la temperatura tanto del aire como del mar tiende a agruparse con las de cercanía en el océano. Esto es debido a que a unos kilómetros de la costa esta región ya es más profunda, y a su vez se puede encontrar influencia tanto de aguas oceánicas como del estuario según el régimen de descargas del Río de la Plata y la dirección e intensidad de los vientos (Guerrero *et al.*, 1997).

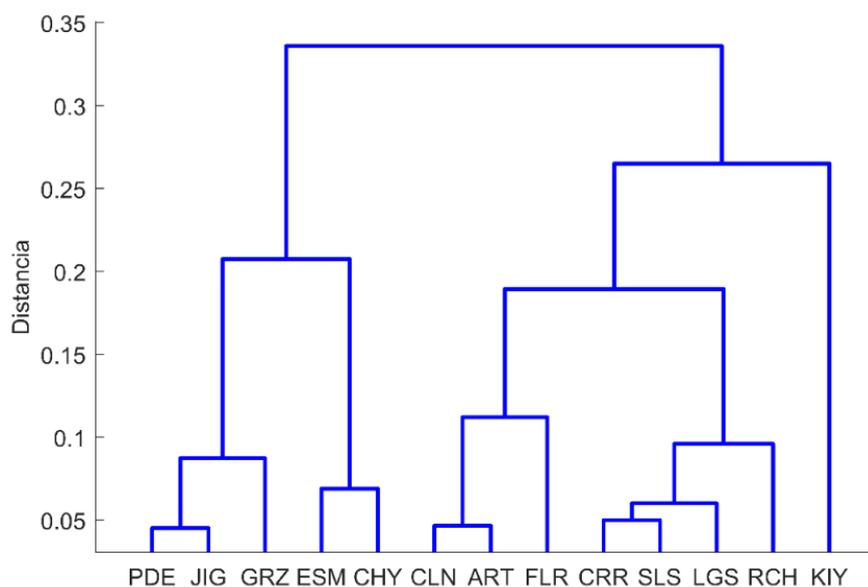


Figura 3.10. Análisis de cluster utilizando el método de Ward para la temperatura del aire. Se utilizaron 2296 datos en los que se contaba con registro simultáneo para las estaciones. La medida de distancia es según la suma de varianzas de la correlación de Pearson. Se observa una clara

segregación con eje O-E con dos grandes grupos con dos subgrupos. Estos están diferenciados por el estuario y el océano.

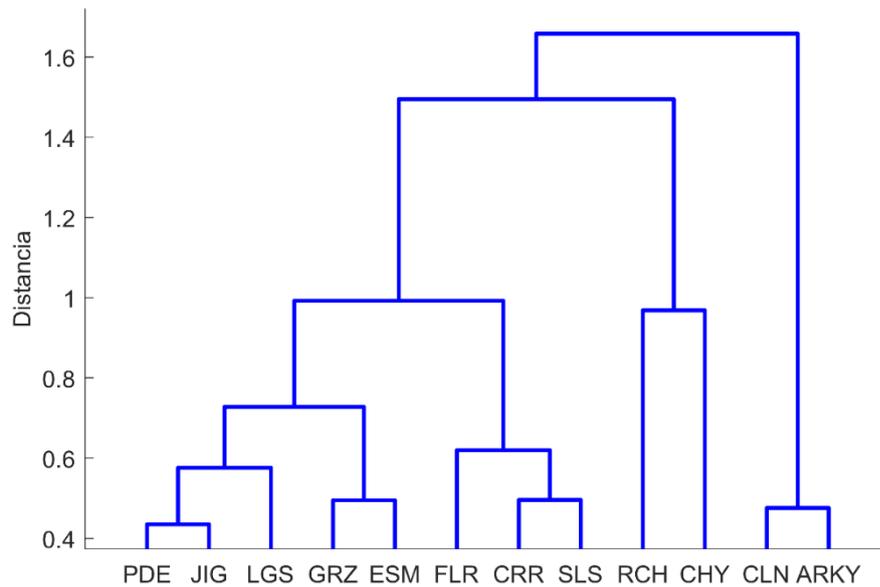


Figura 3.11. Análisis de cluster utilizando el método de Ward para la velocidad del viento. Se utilizaron 2527 datos en los que se contaba con registro simultáneo para las estaciones, fue necesario agrupar ART y KIY en ARKY ya que no coincidían en el tiempo. La medida de distancia es según la suma de varianzas de la correlación de Pearson.

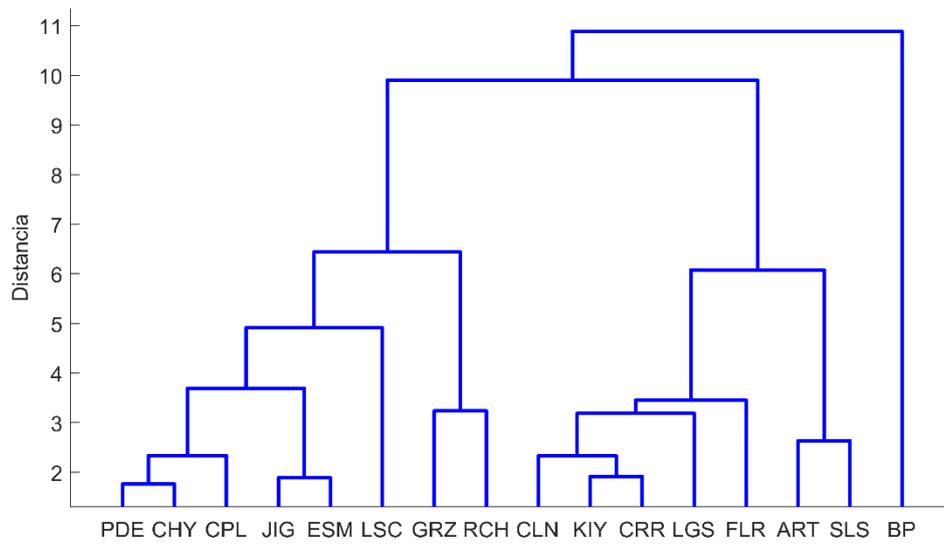


Figura 3.12. Análisis de cluster utilizando el método de Ward para el ciclo diario de viento utilizando los componente u y v (16x48 datos). La medida de distancia es según la suma de varianzas de los componentes u y v .

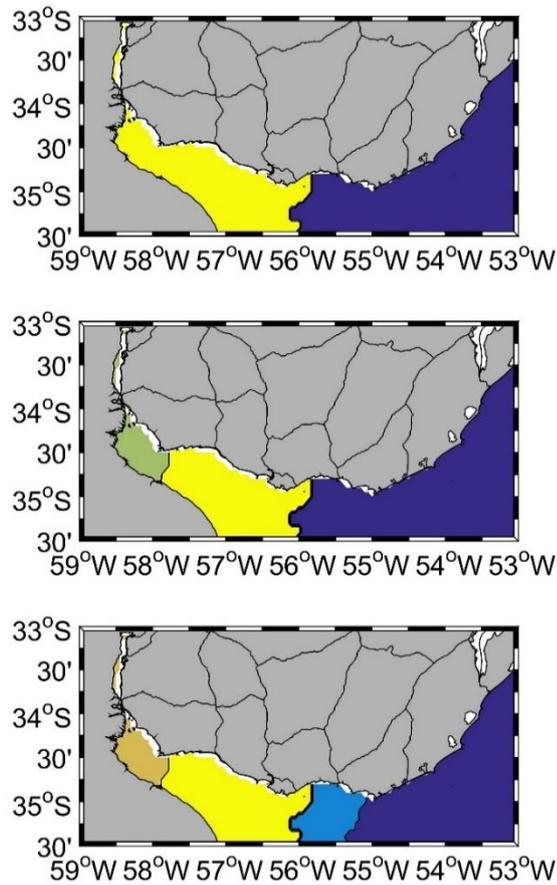


Figura 3.13. Clusters con el método de Ward de temperatura superficial del mar utilizando la media móvil de 2 días de GOES-POES interpolados espacial y temporalmente entre 2012 y 2015.

En base a los análisis de cluster anteriores y la selección de estaciones meteorológicas realizada en la sección 2.3, se definieron 4 regiones agrupadas jerárquicamente primero en 2 y luego nuevamente en 2. Cada región contiene 2 estaciones seleccionadas, una midiendo a 10m de altura y la otra en 30m. La identidad de cada región queda definida por la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Regiones de la costa uruguaya definidas según el comportamiento de la temperatura del aire y mar, y vientos. Se muestran los factores que le aportan identidad a cada subgrupo.

	Acoplamiento Taire-Tmar	Ángulo que forma la orientación de la costa y los vientos prevalentes del NE	Rotación media del ciclo diario de vientos
Estuario Interno	Alto	67,5°	157,5°
Estuario Externo	Medio	67,5°	157,5°
PtadelEste-LaPaloma	Bajo	30°	112,5°
CaboPolonio-Chuy	Bajo	0°	90°

La figura 2.23 resume a modo ilustrativo el procedimiento de los capítulos 2 y 3, desde la recopilación y selección de datos, la caracterización climática y la agrupación.

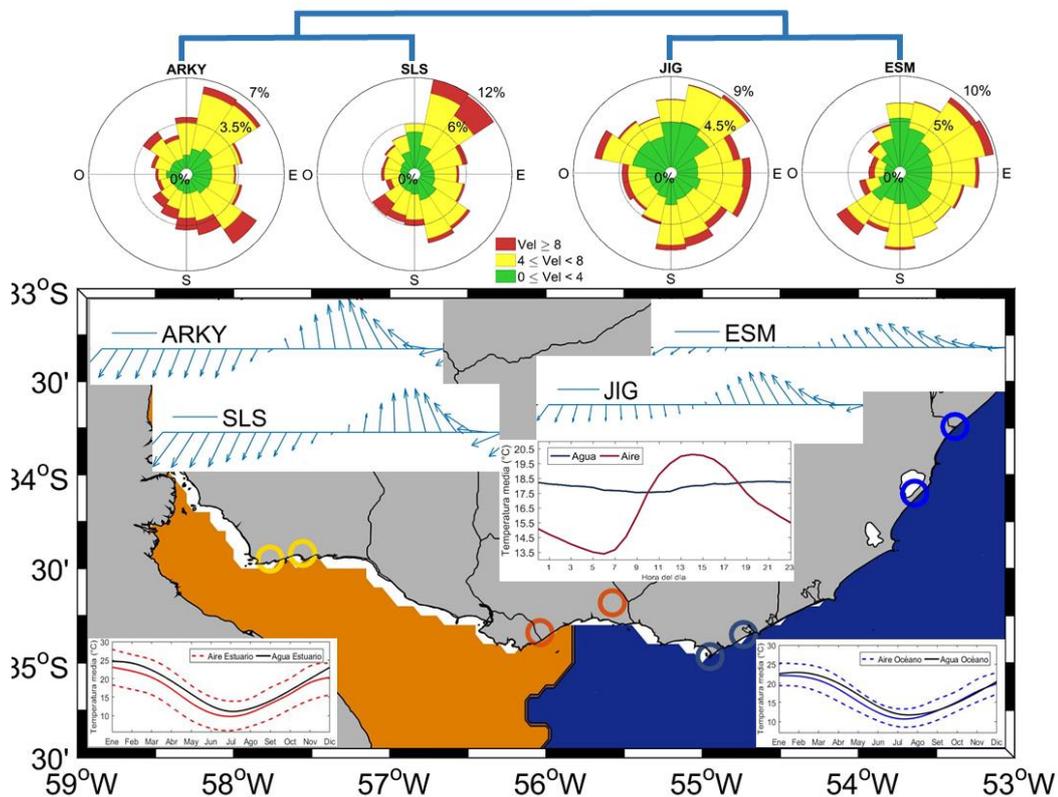


Figura 2.23. Regionalización de la costa según climatología de temperatura de superficie del mar, temperatura del aire, y ciclo diario de vientos. Los círculos muestran la ubicación de las 8 estaciones seleccionadas y los colores el mayor nivel jerárquico de agrupación. Las flechas representan el ciclo diario de vientos (paso horario) para las estaciones seleccionadas que miden entre 30 y 40 metros de altura en cada grupo. Arriba, rosa de vientos para las mismas estaciones (velocidad en $m.s^{-1}$). A su vez, se muestra el ciclo diario de temperatura del aire y mar en Montevideo. Las figuras en los vértices inferiores representan la climatología de la temperatura del aire media, máxima y mínima y la temperatura del mar de los cluster anaranjado y azul representando al estuario y océano respectivamente.

3.4. Resumen del área de estudio

Se regionalizó la costa uruguaya de acuerdo a características climatológicas de temperatura del aire y mar así como del ciclo diario de viento, encontrando 2 grandes regiones que caracterizan el comportamiento en el estuario y el océano, estando a su vez cada una subdividida en 2 regiones con identidad definida.

Se construyó una base de datos con 8 estaciones seleccionadas en 4 regiones definidas en la costa uruguaya. Cada región con una identidad propia y cada estación representativa de cada región. A su vez, estas estaciones seleccionadas se agruparon de a 2 por región, una midiendo a 10 m de altura y la otra entre 30 y 40 m.

La regionalización obtenida sugiere que para una mejor caracterización de las brisas en la costa uruguaya sería importante contar con una estación de INUMET en las costas de Rocha en algún lugar del tramo La Paloma-Chuy, donde hoy día hay un vacío de información. Asimismo, si bien no se profundizó la búsqueda en esta tesis, parece hacer falta mediciones de largo plazo de temperatura del mar en el estuario y en el océano.

El análisis de las estaciones indica que los vientos predominan del NE en toda la costa durante casi todo el año, a excepción de otoño-invierno en el que la frecuencia de vientos del SO es similar a la del NE y en algunas estaciones mayor.

Un resultado destacable es que la brisa se observa en la climatología del ciclo diario en todas las estaciones en tierra.

A diferencia de las otras estaciones, las ubicadas en los cabos atlánticos muestran una mayor frecuencia relativa de vientos del este provenientes desde el mar en comparación con los vientos del norte provenientes desde tierra.

Las condiciones de diferencia entre temperatura del aire y mar que son necesarias para el desarrollo de la brisa (que la temperatura del aire supere a la del mar) se da todos los meses del año, siendo abril y mayo los que se espera que sea menos frecuente.

Se observa que, climatológicamente, la temperatura del aire supera a la del mar entre las 9:00 y las 18:00 hs, y que el viento rota *on-shore* entre las 12:00 y las 19:00 hs. Esto último, de acuerdo a la literatura, sería consecuencia de lo anterior.

Finalmente, existen diferencias climatológicas en cuanto al ciclo diario de viento y temperatura del aire y mar entre el estuario y el océano, lo cual hace esperar que se encuentren diferencias en las brisas de una y otra región.

4. CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LA BRISA MARINA

En este capítulo se caracteriza el clima de brisa marina en la costa uruguaya, objetivo central de la tesis. Para ello se usa la base de datos elaborada en el capítulo anterior y se le incorporan dos nuevos análisis. Por un lado se aplicó un filtro pasa-alto con una media móvil de 24 horas para diferenciar la variabilidad diaria asociada a la brisa, de la variabilidad sinóptica y de menor frecuencia. A su vez se empleó un índice de identificación de días de brisa (IIB). El IIB se aplicó tanto a las series originales identificando días de brisa marina aquí llamadas puras y se aplicó a su vez el IIB a la serie en la que se filtró el flujo sinóptico para identificar aquellos días de brisa marina aquí llamada oculta (en el flujo sinóptico). Por último, se desarrolló un nuevo índice, el de IIB generalizadas (IIBG), siendo este positivo en aquellos casos en que el IIB fue positivo en más de la mitad de las estaciones con dato en la base seleccionada. Luego se utilizó el IIB e IIBG para caracterizar el clima de brisa marina en Uruguay. También se estudiaron las diferencias entre la región del estuario y del océano, el efecto de los campos de presión en la región sobre la brisa marina en Uruguay y la nubosidad asociada al frente de brisa. A continuación se desarrolla el análisis.

4.1. Filtrado de frecuencias mayores a un día

Se utilizaron datos horarios y se filtraron con una media móvil de 24 horas para separar la variabilidad diaria de la sinóptica y de menor frecuencia. De esta manera se generaron dos series nuevas a partir de la original:

-La serie con la media móvil, que representa la variabilidad de baja frecuencia, fundamentalmente sinóptica, y otras de menor frecuencia (intraestacional, estacional, interanual, etc.)

-La serie de variabilidad diaria definida como la serie original menos el filtro de media móvil. Esto representa la variabilidad del ciclo diario, relacionado estrechamente con la brisa.

La media móvil suaviza los datos reemplazando cada punto de datos con el promedio de los puntos de datos vecinos definidos dentro de una ventana, en este caso el promedio de las 12 horas anteriores y las 12 posteriores al punto. Este proceso es equivalente al filtrado pasa bajo con la respuesta del suavizado dado por la ecuación:

$$M(i) = \frac{1}{2N + 1} (y(i + N) + y(i + N - 1) + \dots + y(i - N)) \quad (4.1)$$

Donde $M(i)$ es el valor suavizado para el i -ésimo punto de datos, N es el número de puntos de datos vecinos a ambos lados de $M(i)$, “ y ” es la función

original y $2N + 1$ es el intervalo usado en el filtrado. Por último, la serie diaria $S(i)$, se calculó como:

$$S(i) = y(i) - M(i) \quad (4.2)$$

Se probó a su vez el filtro Lanczos (ver Emery y Thomson 2001, págs. 533-539) pero finalmente se optó por la media móvil centrada, ya que era más simple y captaba mejor la estructura de la variabilidad de baja frecuencia. Como ejemplo, la figura 4.1 muestra un mes de datos de viento con resolución horaria en José Ignacio con el que se realizaron varias pruebas para los filtros. Durante este mes se observan días de brisa dominante (100-200 en eje x), días sin brisa (0-100) y días con brisas ocultas en un flujo sinóptico predominante del noreste (500-600). Se observa que la serie de variabilidad diaria obtenida restando la media móvil centrada captura mejor los días de brisa.

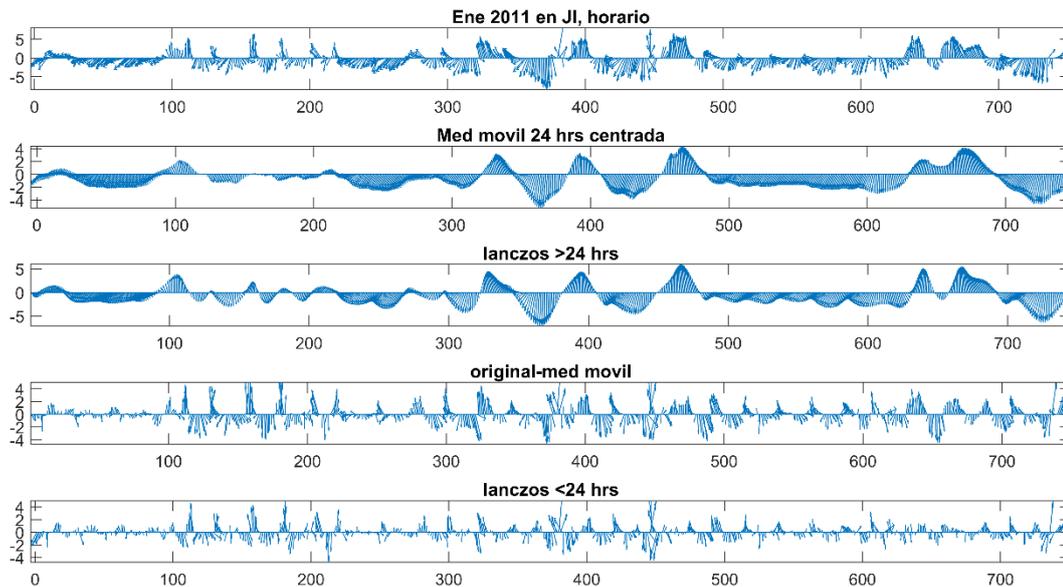


Figura 4.1. Viento con resolución horaria en José Ignacio en enero de 2013 con el que se realizaron varias pruebas para los filtros. De arriba hacia abajo se muestra los datos originales, la media móvil de 24 horas, los datos con filtro lanczos de frecuencias menores a 24 horas, los datos originales – la media móvil de 24 horas, y los datos con filtro lanczos de frecuencias mayores a 24 horas.

También se realizó un análisis de densidad espectral con el método de Lomb-Scargle (Zechmeister y Kürster, 2009) para evaluar el espectro de potencia del viento así como el funcionamiento de los filtros. La figura 4.2 muestra la densidad espectral de la componente perpendicular (*across-shore*) y paralela (*along-shore*) del viento en ambos casos para la media móvil y la serie diaria. Se observa cómo el ciclo diario de vientos, en la serie diaria de principal interés, se captura de buena forma con el filtro. A su vez se puede observar mayor densidad espectral en las bajas frecuencias

asociado principalmente con la variabilidad sinóptica en la componente *along-shore* (eje SO-NE) que en la *across-shore* mientras que en la frecuencia con período de 1 día se observa gran densidad espectral en la componente *across-shore*, vinculada con el ciclo diario de vientos y la brisa marina. La serie original es simplemente la combinación de ambas.

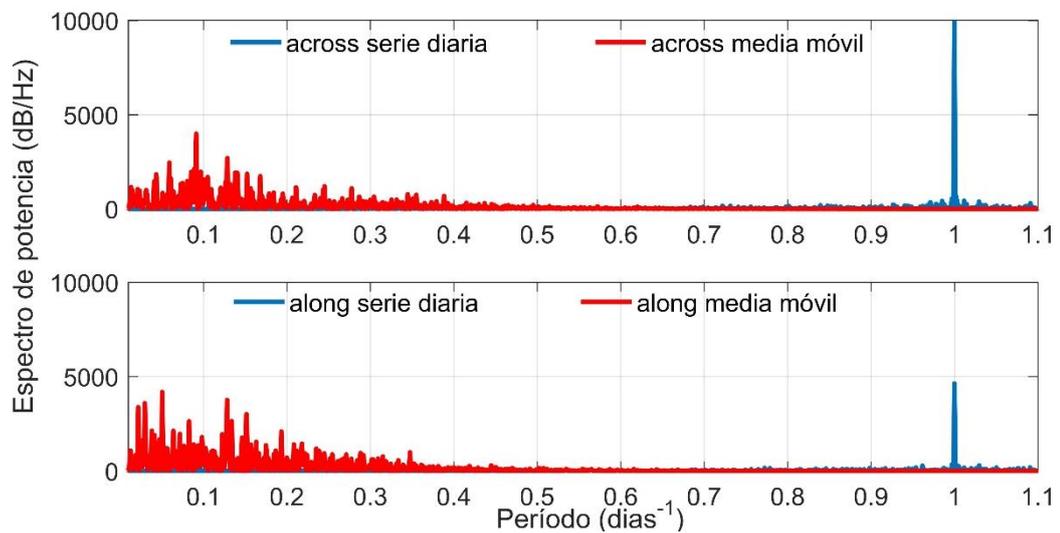


Figura 4.2. Análisis espectral para la componente *along-shore* y *across-shore* del viento en José Ignacio utilizando 2 años seguidos de datos con resolución horaria con el método de Lomb-Scargle. En rojo la media móvil de 24 horas y en azul la serie diaria. La serie original es simplemente la combinación de ambos.

4.2. Índices de identificación de brisas (IIB) y brisas generalizadas (IIBG)

El IIB busca encontrar aquellos días en el que ocurrió el fenómeno de brisa marina en el Uruguay. Para ello se utilizó la velocidad y dirección de viento promedio a las 08:00 y a las 16:00 hs, horarios en los que en un día típico de brisa el viento sopla de tierra y del mar, respectivamente. Para ser un día de IIB positivo en la estación meteorológica se deben de cumplir las condiciones siguientes:

$$Vel(16:00) - Vel(08:00) > 2m.s^{-1} \quad (4.3)$$

Y:

$$Dir(16:00) - Dir(08:00) > 45^\circ \quad (4.4)$$

Para cumplir estas condiciones a su vez a la serie se la pre-procesó de la siguiente manera:

El 0° se colocó en el Oeste (270°) de la siguiente manera:

$$Dir_{nueva} = Dir + 90^\circ \quad (4.5)$$

$$Si Dir_{nueva} \geq 360^\circ \rightarrow Dir_{nueva} = Dir_{nueva} - 360^\circ \quad (4.6)$$

Así, el cruce del 359 al 0 en el índice, el cual provoca un falso negativo, se da del 3^{er} al 4^{to} cuadrante y no del 4^{to} al 1^{ero}, ya que es común en el fenómeno de brisa marina en nuestra costa la rotación del 4^{to} al 1^{ero} y no así del 3^{ero} al 4^{to}.

A su vez,

$$\text{Si } Vel(08:00) < 2m.s^{-1} \rightarrow Dir_{nueva} = 90^{\circ} \quad (4.7)$$

Al colocar la dirección nueva en el norte cuando el módulo de viento es bajo, se logra captar aquellos días en los que no hay viento en la mañana y se pone *on-shore* en la tarde, siendo esto un fenómeno muy común en la costa. Además, cuando el módulo del viento es bajo puede venir de varias direcciones o incluso es común que en las estaciones convencionales no se registre la dirección del viento. El último filtro permite evitar los falsos negativos en esos casos.

Los umbrales para el IIB se definieron en base a los datos, tomando como referencia ciertos días con desarrollo de brisa marina muy evidente y teniendo en cuenta las estaciones donde climatológicamente el viento rota menos y las que a su vez este se intensifica menos. Sin embargo, la restricción en el horario y en el sentido de la rotación es la que permite filtrar la gran mayoría de los falsos positivos, y no así el valor de los umbrales, los cuales en la bibliografía suelen ser ajustados empíricamente (ej. Biggs y Graves, 1962; Steele *et al.*, 2015; Pazandeh *et al.*, 2016). Más adelante en este capítulo la figura 4.5 muestra el análisis de sensibilidad para los umbrales del índice.

Luego de obtener los IIB positivos para cada estación a lo largo de la costa, se definió el Índice de Identificación de Brisas Generalizadas (IIBG) para

cada día. El IIBG es positivo cuando el IIB es positivo en al menos la mitad de las estaciones con dato por día.

Este IIB cuenta con la ventaja de ser simple ya que necesita poco *input* de datos, es robusto ya que proporciona pocos falsos positivos (algún frente asociado a un sistema sinóptico que ingresa por el 2^{do} o 3^{er} cuadrante en la tarde luego de una mañana de viento calmo), y es aplicable prácticamente a todas las estaciones meteorológicas de la costa uruguaya debido a que contempla las variaciones a lo largo de la costa, por ejemplo que el viento relacionado con la brisa marina en el este alcanza mayores velocidades y rota menos que con respecto al oeste (Fig. 4.11), y a su vez contempla las variaciones en la altura a la que se encuentran las estaciones. En los siguientes párrafos se desarrollan algunos de los análisis de sensibilidad hechos para el IIB.

José Ignacio es la única estación con la que se cuenta con registros simultáneos cercanos a 10 y 40 metros para poder comparar. La resta entre las 16:00 y las 08:00 hs es $\sim 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $\sim -30^\circ$ para la velocidad y dirección, respectivamente, en 40 m como en 12,4 m de altura (Fig. 4.3). En valor absoluto, la resta de velocidades es un poco mayor para 40 m y la de dirección para 14 m. Esta compensación con la altura se tuvo en cuenta a la hora de seleccionar el IIB. Al aplicar el IIB en José Ignacio en altura, se observan resultados similares, (19, 18 y 16 % de días con brisa en 12, 40 y 98 metros respectivamente) con una leve tendencia decreciente de -3% de días con brisa. 100 m^{-1} de altura y no lineal, ya que el IIB varió solamente

-1% en los primeros 40 metros (Fig. 4.4). Es de destacar que, en las torres de UTE el instrumento que mide la velocidad del viento y el que mide la dirección son diferentes, y en este caso la serie temporal utilizada para calcular el IIB de dirección a 40 y 14 m es compartida, ya que es la misma veleta que desde el 01/01/2011 hasta 15/03/2015 estuvo a 40m y luego a 14m hasta el 28/02/2017. Los porcentajes son diferentes porque para los días en el que el viento era menor a $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se le asignaba a la dirección 0 (90 luego de la rotación), y eso sucede con mayor frecuencia a menor altitud (Fig. 4.4).

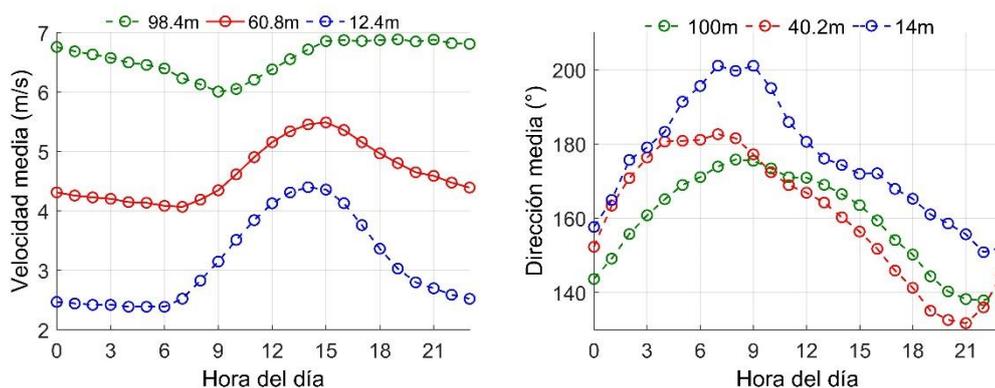


Figura 4.3. Perfil vertical del ciclo diario de vientos en José Ignacio. A la izquierda se muestra la velocidad a 3 alturas diferentes y a la derecha la dirección a 3 alturas diferentes. Entre las 16:00 y las 08:00 hs, las curvas de 40 y 14 metros tienden a ser paralelas. Esto fue tenido en cuenta para realizar el índice aplicable a ambas alturas de medición.

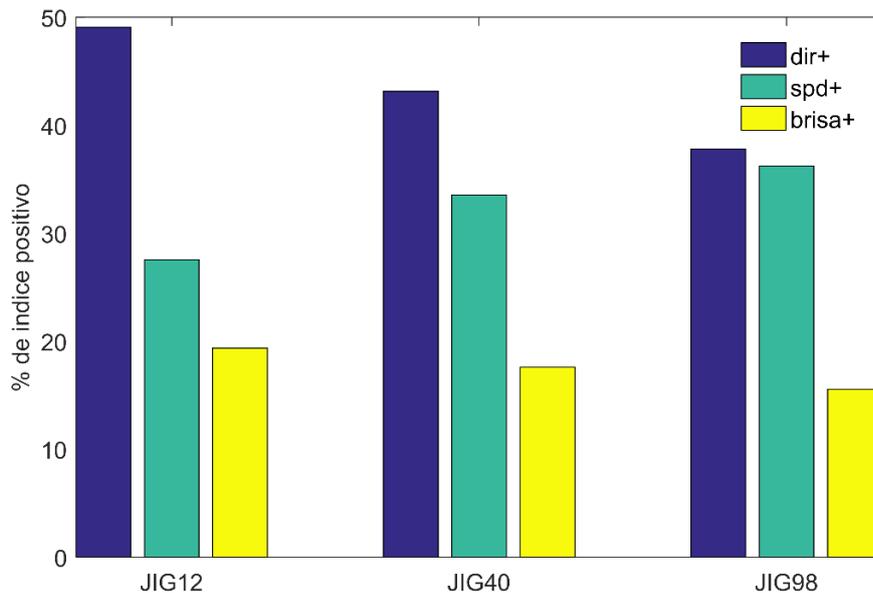


Figura 4.4. Porcentaje de días positivos en los diferentes índices. La serie temporal de dirección es la misma para 40 y 12 metros, Se observa que el filtro de la dirección (dir+) decrece con la altura y el del módulo de la velocidad (spd+) se intensifica con la altura, por lo que en cierto modo se compensan en el resultado del índice que exige ambos positivos (brisa+). Los porcentajes de días con brisa son 19, 18 y 16 para 12 m, 40m y 98 m, respectivamente, para el periodo enero 2011 a setiembre 2016.

El análisis de sensibilidad del índice indica en primer lugar que todas las estaciones varían con el mismo signo al cambiar los umbrales, de modo que al disminuir o aumentar el valor exigido de incremento de rotación o velocidad del viento el porcentaje aumenta y disminuye, respectivamente. A grandes rasgos, al aumentar (disminuir) el umbral en 1 m.s^{-1} el porcentaje de brisas disminuye (aumenta) en un 30% y un aumento (disminución) en la rotación exigida de 15° disminuye (aumenta) en un 10%. Existen variaciones espaciales que se observan principalmente en las estaciones

de los extremos con los umbrales extremos, donde el factor limitante en el oeste es la intensidad y en el este es la dirección. Esto se debe a que el índice se comporta mejor en las estaciones del centro (CRR-JIG) como se ve más adelante en este capítulo (Fig. 4.5).

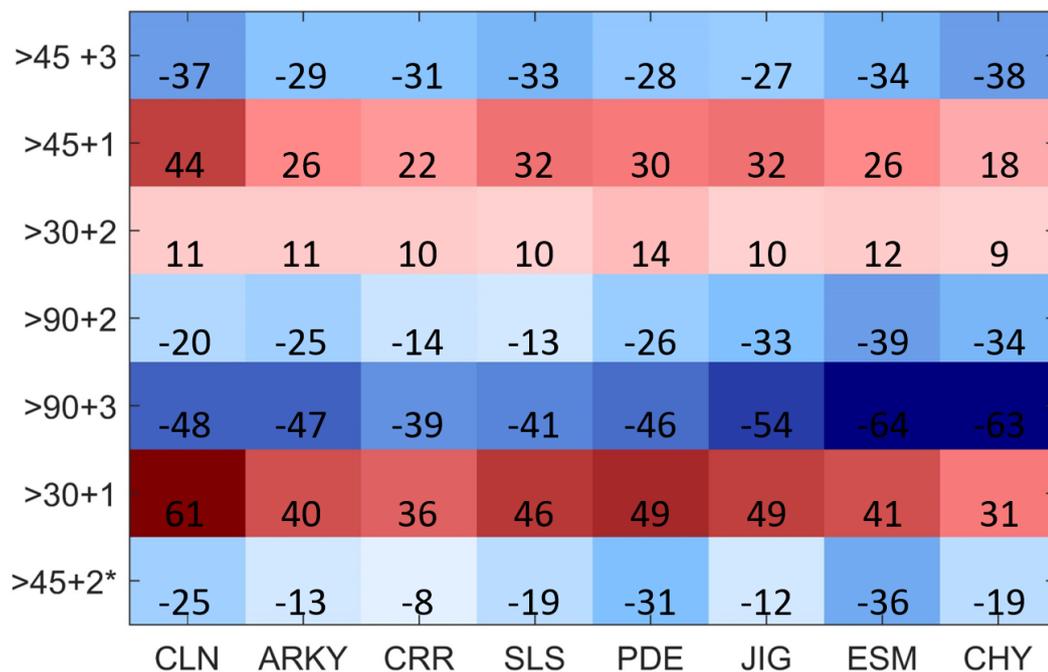


Figura 4.5. Sensibilidad del índice de identificación de brisas según los valores. La matriz muestra el porcentaje de incremento o disminución con respecto al valor que obtuvo la estación con los umbrales del índice finalmente seleccionado. El eje horizontal muestra la estación y el vertical los diferentes tratamientos. El 1^{er} término (> X) representa cuanto se le exige rotar en sentido horario y el 2^{do} cuanto se le exige que se incremente el módulo de la velocidad. *Representa los valores umbrales utilizados originalmente pero sin el filtro de que cuando la velocidad del viento es menor a 2 m.s⁻¹ no se considere la dirección.

La decisión de no agregar más filtros al índice se tomó teniendo en cuenta el compromiso entre disponibilidad de datos, capacidad de aplicarlo a todas las estaciones, y la mejora en la eficacia al agregar complejidad. La diferencia entre la temperatura del aire y mar, así como la humedad, podrían haber sido útiles pero su cobertura espacial y temporal era escasa.

A los efectos de la aplicación en esta tesis, se asume que el índice IIB identifica correctamente aquellos días donde la brisa marina es fácilmente identificable en relación al flujo sinóptico y se da de forma generalizada a lo largo del país. Estos días luego fueron utilizados para describir la climatología de brisas, estudiar la variabilidad interanual, situación sinóptica asociada, etc.

4.3. Brisas predominantes y brisas ocultas en el flujo sinóptico

Tanto el IIB como el IIBG encuentran aquellos días donde el viento es en gran parte generado por la brisa marina. Existen, otros días, quizás más que los que encuentra el IIB, en que la brisa se desarrolla en un flujo sinóptico que provoca “deformidades” en la celda de circulación. En general durante estos días tanto la resta de la dirección como del módulo de la velocidad entre las 16:00 y las 08:00 hs es menor que los días de brisa pura o dominante. Hasta donde se incluyen o no estos días en el

índice de identificación, es en general el responsable de las grandes variaciones de cantidad de días de brisa reportadas en otras localidades, (ej. Azorin-Molina *et al.*, 2011; Cisneros y Piccolo, 2011), lo que hace muy difícil comparar regiones y resultados, ya que a su vez el índice suele tener que ser adaptado a cada localidad, por más intenciones que se tenga de utilizar el mismo. La forma en que esta tesis atacó este problema fue separando las brisas “puras” y las brisas “ocultas” en el flujo sinóptico (ej. Miller *et al.*, 2003, Steele *et al.*, 2015). Las puras en este caso son las del IIB positivo en la serie original y las ocultas las de IIIB positivo en la serie diaria y que no fueron IIB positivo en la serie original. Para aplicar el índice a la serie diaria se realizó un cambio en el umbral necesario para que sea positivo la resta entre las 16:00 y las 08:00 hs de velocidad de viento. El valor crítico se cambió de 2 a 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ya que los valores de velocidad de la serie diaria suelen ser mucho menores que los originales. También se cambió la dirección en los casos en que la velocidad era menor en este caso a 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ por la misma razón mencionada anteriormente. Para el caso de la dirección se mantuvo la misma condición de rotación necesaria de al menos 45° en sentido horario.

4.4. Aplicación del índice de brisa

La figura 4.7 muestra el porcentaje de casos positivos para cada estación. Siempre que se calcularon porcentajes totales por estación se realizó primero por mes y luego promediando los meses, para evitar la sub o sobrestimación debido a la heterogeneidad en la distribución temporal de los datos (estaciones con un año y medio de datos que incluya dos veranos tiende a sobreestimar el porcentaje total y una estación con un año y medio en invierno a subestimar, ya que la cantidad de eventos de brisa marina tiende a concentrarse en los meses de verano). También se tomó la precaución de remover la ausencia de dato para calcular el porcentaje. Se observa que en las tres estaciones más hacia el O tiende a haber más casos que cumplen con el criterio de dirección, mientras que en las cuatros del E tiende a haber más casos que cumplen con el criterio de velocidad. El índice sería más apto para las estaciones intermedias, pero de alguna manera logra balancear las diferencias entre las brisas del O (donde rota más) y las del E (donde se intensifica más).

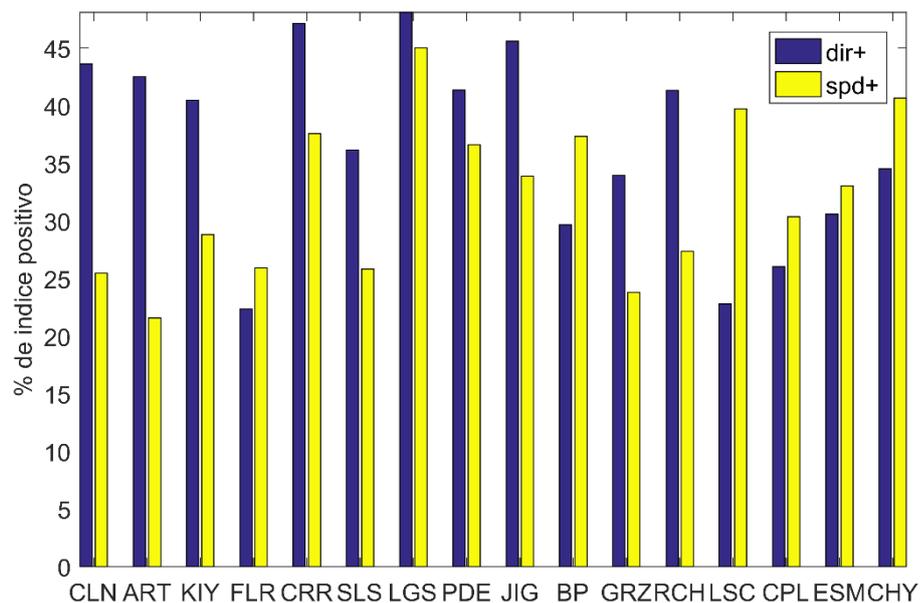


Figura 4.7. Porcentaje de casos positivos al índice con respecto a que rote el viento (azul) y se intensifique (amarillo).

El porcentaje de días donde el índice de brisa fue positivo para cada estación muestra un rango de variabilidad desde 7,1 a 24,7% de días con brisa en Florida (FLR) y Laguna del Sauce (LGS), respectivamente. La media de días con brisa es 16,3%. Este es de los pocos análisis que se aplicó a todas las estaciones y el amplio rango de variabilidad tiene varias justificaciones que se detallan a continuación. El primero es la cantidad disponible de datos que varían desde 1 a 6 años según la estación (ver Fig. 2.4). El mínimo de brisas lo registró FLR, lo cual es esperable debido a la lejanía a la costa. Los porcentajes más altos tendieron a registrarse en las estaciones convencionales. Lascano (LSC), también se encuentra lejos de

la costa, pero registra hasta un 11% de días con brisa, mientras que el bajo porcentaje de Las Garzas podría estar relacionado con el hecho de que mide la dirección cada 22,5° mientras que las demás lo hacen cada 10° o 1°. La Boya Petrolera y Cabo Polonio (CPL) parecerían tener un clima más marítimo en donde el viento de tierra tiende a ser menos frecuente y la velocidad media más intensa. El resto de las estaciones son las selectas, aquellas representativas de la región, cerca de la costa y con amplia cobertura temporal de datos (Fig. 4.8). Al desglosar el porcentaje de días con brisa marina por estación y por mes, si bien la señal es ruidosa, se observa que los meses de diciembre a marzo son los que registran los mayores porcentajes y junio a agosto lo que registran los menores. El máximo se observa en LGS y RCH en marzo y en JIG y CHY en enero con calores entorno al 35% de días con brisa marina (Fig. 4.9).

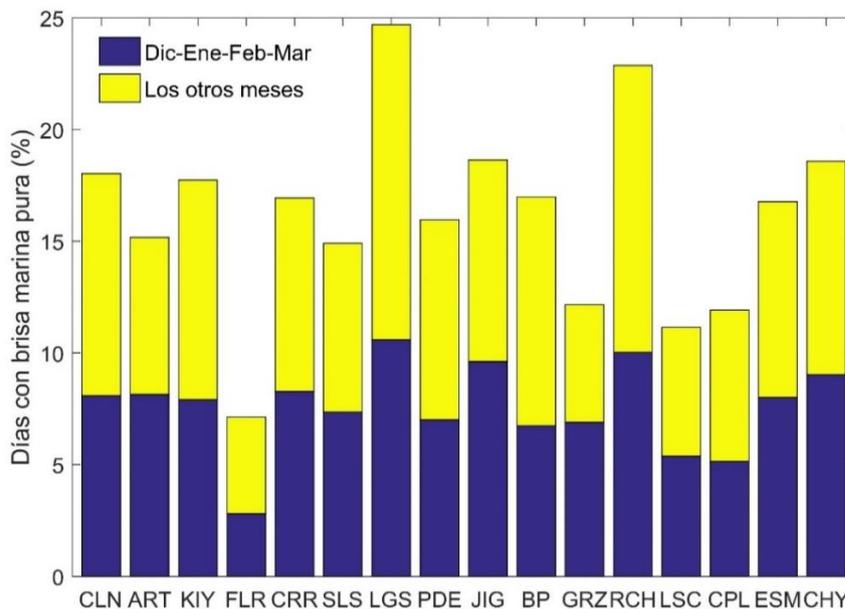


Figura 4.8. Porcentaje de eventos de brisa marina según el Índice de Identificación de Brisas entre 2011 y 2016 por estación.

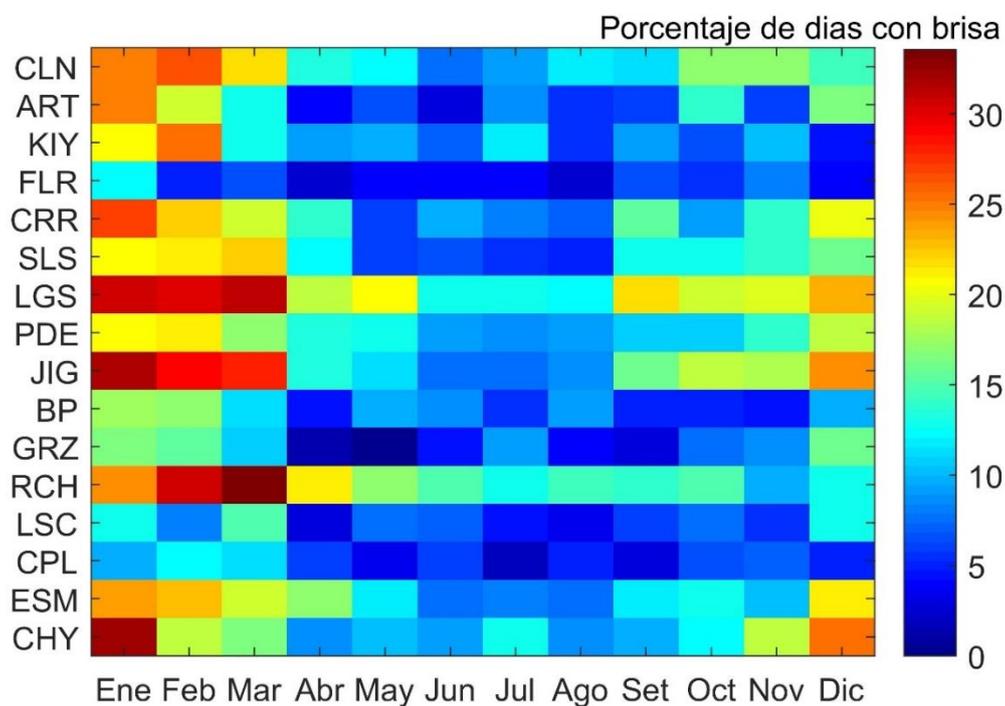


Figura 4.9. Porcentaje de días donde el índice de brisa fue positivo para cada estación por mes.

Luego de esta visión general que incluye el análisis de todas las estaciones, para estudiar el clima de brisas se usaron las estaciones selectas, de modo de obtener una señal menos ruidosa.

4.5. Clima de brisas

En esta sección se estudia el clima de brisas en Uruguay. Para ello se hace referencia a 3 series de datos diferentes, todas derivadas de las estaciones selectas: Las brisas puras (índice positivo en la serie original), las brisas ocultas (índice positivo en la serie diaria) y las brisas generalizadas (índice positivo en la serie original en al menos la mitad de las estaciones con dato).

La climatología, variabilidad interanual y persistencia de eventos, se estudió con las brisas puras.

Con las brisas ocultas se calculó la frecuencia total y por estación de estos eventos, discriminando a su vez entre los meses dentro y fuera de verano. Los días de brisa generalizada se calcularon solo para las brisas puras, y estos días pueden haber tenido hasta 3 de 8 estaciones con índice negativo. Con la serie de brisas generalizadas, también se calculó la climatología, variabilidad interanual y la persistencia de eventos, y a su vez se utilizó para las secciones 4.8 y 4.9. En esas secciones se estudiaron procesos de mayor escala asociados a los eventos de brisa marina como las condiciones sinópticas y el frente de brisa por satélite, por lo que en estos casos se optó por tomar la serie que representara mejor la ocurrencia del evento en la totalidad del país.

4.5.1. Brisas “puras”

Se encontró un promedio de brisas puras por estación de 17,0% entre el 1° de enero de 2011 y el 31 de diciembre de 2016 (373 días en 2192), totalizando un promedio de 62 eventos por año. En cuanto a las brisas generalizadas, se encontraron 312 días correspondiendo a un 14,2% con un promedio anual de entre 51 y 52 eventos por año. La cercanía de estos 2 valores sugiere que si bien puede haber cierta variabilidad a lo largo del país, en general cuando hay un día de brisa ocurre probablemente en gran

parte o toda la costa. De ocurrir los eventos de brisa por estación de forma aleatoria (al menos 4 de 8 eventos independientes con una probabilidad de éxito de 0,17) el valor del índice de brisas generalizadas sería menor al 1%. Este resultado es consistente con fenómenos atmosféricos de escala sinóptica favoreciendo el desarrollo de la brisa en toda la costa.

En la Tabla A1 del Anexo II se puede consultar el valor del IIBG por día para todos los días donde al menos una estación contó con IIB positivo.

La figura 4.10 muestra la climatología de cantidad de días de brisa pura ajustando la curva suavizada del promedio, máximos y mínimos. Cada punto representa el valor de días de brisas puras para cada año. Los meses con más cantidad de brisas son enero, febrero y marzo con un promedio de casi 8 días por año cada mes, y le sigue diciembre con 7. El período junio a agosto inclusive es el período con menor promedio de brisas con 3 por mes. Marzo, enero y noviembre son los que presentan mayor variabilidad interanual, principalmente marzo, que presentó valores de 4 a 13, siendo este valor el máximo registrado (Fig. 4.10).

La climatología de las brisas generalizadas muestra que para los meses de enero, febrero y marzo la media se ubica levemente por encima del promedio de brisas puras (menor a 1 día) y para el resto de los meses por debajo (Fig. 4.10). Si bien hay un factor probabilístico, ya que en los meses donde hay más positivos crece aún más la probabilidad de que al menos la

mitad lo sean, eso no explica este comportamiento. La explicación a esa pequeña diferencia es que probablemente durante enero a marzo se den de forma más frecuente las condiciones sinópticas para tener brisa en la mayor parte del país, y que el índice de brisas generalizadas filtre tanto el ruido que puede existir debido a falsos positivos (los cuales contribuyen al promedio de brisas puras) como la variabilidad espacial y posibles efectos locales.

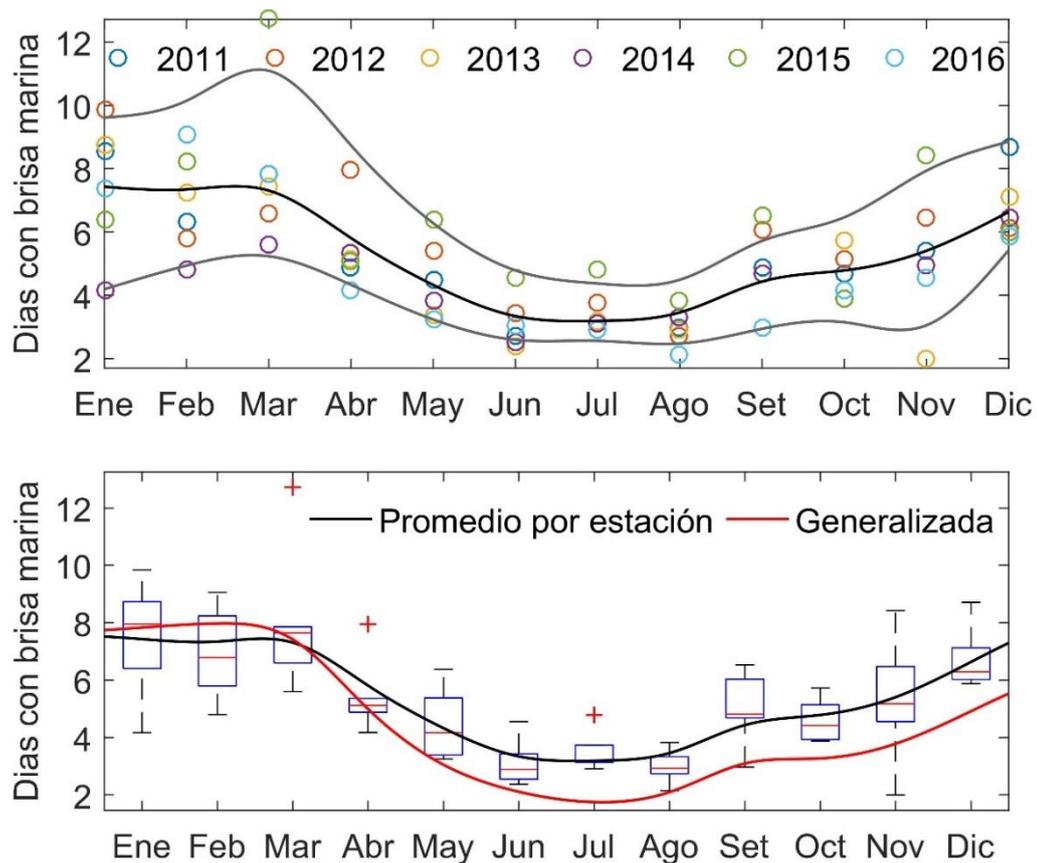


Figura 4.10. Climatología de cantidad de días de brisa pura. Arriba, la curva es un ajuste de la media suavizada en negro y los mínimos y máximos en gris. Cada punto de color representa el valor para cada año. Debajo, la misma climatología de cantidad de días de brisa pura está agrupada en un diagrama de cajas. En rojo (negro), el ajuste de la media suavizada para las brisas generalizadas (puras).

La variabilidad interanual que se observa en 6 años estudiados va desde 51 y 44 eventos en 2016 a 71 y 66 eventos en 2015 para el promedio de brisas por estación y brisas generalizadas, respectivamente. La media (μ) y el desvío estándar (σ) es de 52 ± 8 brisas generalizadas por año y 60 ± 7 brisas puras por estación por año (Fig. 4.11). El bajo número de años analizados dificulta realizar estadísticas climatológicas, pero a continuación se resume algunas observaciones. Según estos 6 años relevados, la variabilidad interanual sería de 11,6% y 15,3% para el promedio de brisas puras y brisas generalizadas respectivamente, tomando como referencia σ con respecto a μ . Esta variabilidad está determinada principalmente por el periodo noviembre-marzo. Mientras los años de muchas brisas presentaron muchos eventos en los extremos del verano (noviembre, a pesar de que no se encuentra en verano, y marzo), los años de pocas brisas presentaron pocos días en los meses centrales del verano (enero-febrero), como es el caso de 2014, año donde estos meses tuvieron el 50% de brisas menos que la media. En 2015, año con mayor cantidad de brisas, noviembre y marzo tuvieron casi un 50% más de brisas que la media mensual. El 2012, el segundo año con mayor cantidad de brisas, presentó 8 de 12 meses por arriba de la media, con la mayor diferencia en los meses de abril y noviembre (Figs. 4.10 y 4.11).

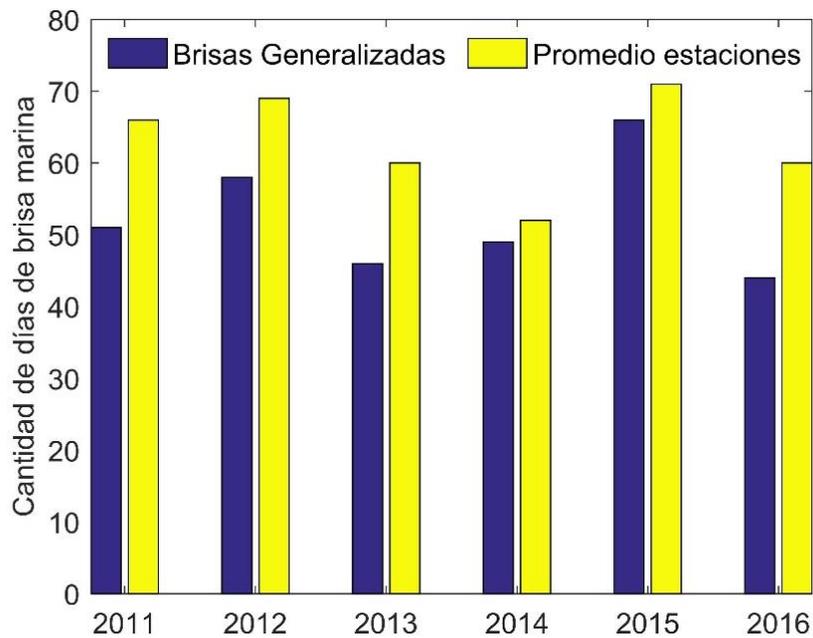


Figura 4.11. Cantidad de eventos de brisa marina generalizada (azul) y promedio de días con brisa marina pura por estación y por año.

Por estación, la media de brisas puras y el desvío son 17,0 % y 1,3%, respectivamente, siendo SLS y JIG los extremos 14,9 y 18,6%, respectivamente. A su vez, el período diciembre a marzo concentra el 48,3% de los eventos de brisa marina y el resto de los meses el 51,7% (Fig. 4.12).

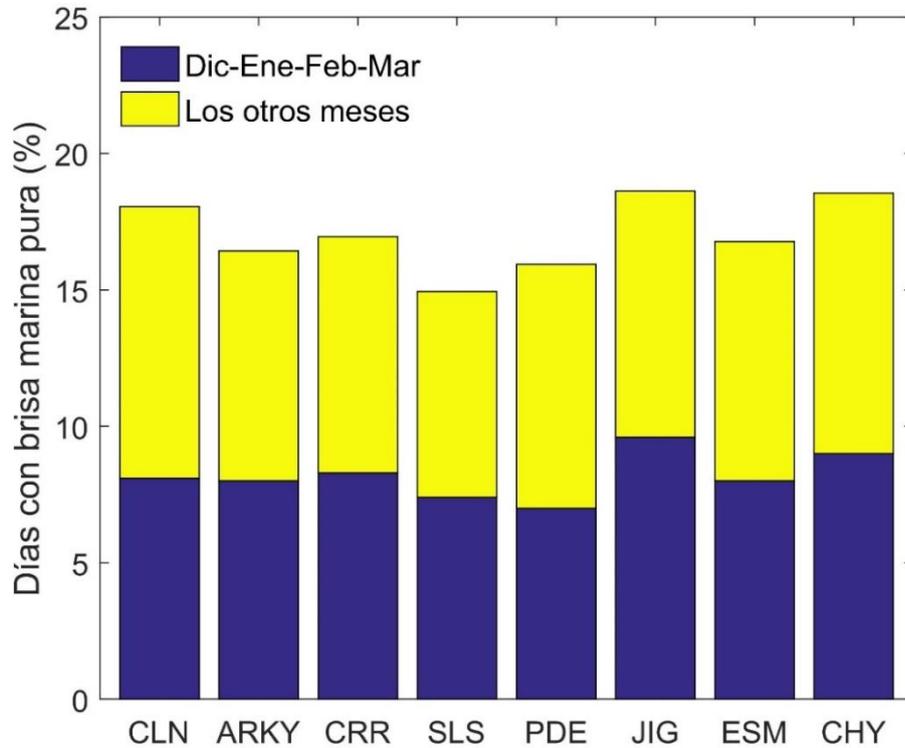


Figura 4.12. Porcentaje de eventos de brisa marina pura en el periodo 2011 a 2016 en las diferentes estaciones. En azul se muestra el porcentaje que aportan los meses de diciembre, enero, febrero y marzo y en amarillo los otros meses.

Al comparar el resultado del IIBG en relación al IIB por cada estación, se observa un patrón que tiende a verse en todo este trabajo con respecto a las brisas y al índice. La correlación, si bien es en todos los casos es significativa (t-test, $p < 0,05$) tiende a ser más baja en los extremos (CLN-ARKY y ESM-CHY), y alta en las estaciones intermedias. En particular las estaciones entre CRR y JIG son las que tienen mayor coincidencia con las

brisas generalizadas (Tabla 4.1). O sea que si ocurre una brisa en estas estaciones entonces hay mayor probabilidad que sea una brisa generalizada.

Tabla 4. 1. Correlación de Pearson entre el Índice de Identificación de Brisas por estación (IIB) y el Índice de Identificación de Brisas Generalizadas (IIBG). Si bien todas son significativas (n=2192 – la ausencia de datos según cada estación), se destaca la correlación mayor de las 4 estaciones centrales en negrita.

CLN	ARKY	CRR	SLS	PDE	JIG	ESM	CHY
0,347	0,403	0,521	0,492	0,515	0,523	0,390	0,245

4.5.2. Brisas ocultas

Las brisas ocultas en el flujo sinóptico se calcularon aplicando el IIB a la serie diaria modificando los umbrales como se menciona en la sección 4.3., únicamente para las estaciones que miden cercano a 10 metros de altura y en los períodos con registro de 24 horas. Esto debido a que hace falta una cobertura temporal de 24 horas para el correcto cálculo de la media móvil y a que el valor que se resta no representa lo mismo para las diferencias en altura (el viento en altura durante la noche es más intenso). No se incluyeron los días de brisa oculta que habían sido previamente identificados como días de brisa pura en cada estación. Se observa que el porcentaje de brisas ocultas llega a 16,8%, muy similar a las puras (17,0%). Sin embargo, las brisas ocultas se concentran mayormente en los días

fuera de verano (10,3; Fig. 4.13; Tabla 4.1), probablemente debido a que durante los meses fuera de verano los sistemas sinópticos suelen ser más frecuentes e intensos, (ej. ingreso de frentes).

Se observa en la estación CHY un porcentaje muy bajo de brisas ocultas durante el verano, probablemente debido a que allí la brisa y los vientos prevalentes en verano tienen casi la misma dirección y entonces la brisa oculta podría estar siendo filtrada (Fig. 4.13).

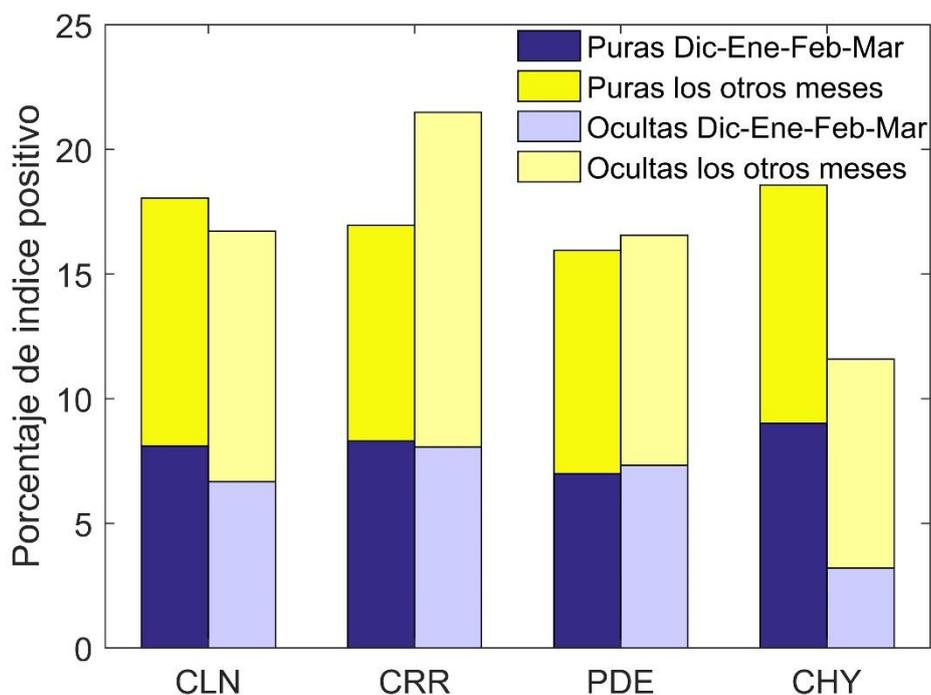


Figura 4.13. Porcentaje de eventos de brisa marina en el periodo 2011 a 2016 en las diferentes estaciones. En azul se muestra el porcentaje que aportan los meses de diciembre, enero, febrero y marzo y en amarillo los otros meses. Las barras de la izquierda para cada estación muestran el porcentaje de eventos con la serie diaria (filtrada pasa alto), y las de la derecha con la serie original.

Tabla 4.2. Porcentaje de brisas puras y ocultas, discriminando entre el total, el porcentaje relativo en el periodo de verano (dic-mar) y los otros meses, y el cociente entre las brisas ocultas y las puras para las estaciones de medición a 10 metros de altura en los períodos de cobertura de 24 horas en el caso de las ocultas.

Días con Brisa	Total (%)	Ene-Feb-Mar-Dic-(%)	Los otros meses (%)	Ene-Dic/ Los otros meses
Puras	17,0	8,3	8,7	1,0
Ocultas	16,8	6,3	10,3	0,6
Ocultas/Puras	1,0	0,8	1,2	0,6

De la Tabla 4.2, se observa que ocurren aproximadamente 60 días al año donde la brisa marina domina el flujo, y otros 60 donde está oculta en el flujo sinóptico. De las 60 dominantes, 30 ocurren en verano (dic-mar) y 30 en el resto del año. De las 60 ocultas, 20 ocurren en verano y las otros 40 en el resto del año.

4.5.3. Persistencia de días con brisa

El siguiente análisis consistió en estudiar la persistencia de los días de brisa generalizada y un caso particular en Carrasco tanto para las puras como las ocultas y puras en su conjunto. Para ello, se definieron los días con brisa seguidos como la cantidad máxima donde el IIB(G) fue positivo de forma seguida. En los casos donde se encontraba un IIB(G)- entre dos IIB(G)+, al IIB(G)- se le asignó IIB(G)+ y se asumió que se debió a una falla en la capacidad de capturar el día del IIBG ya que en general, se daba que más

de una estación poseía IIB+ en estos días a pesar de no alcanzar la mitad de positivos con dato. Se encontraron 167 días seguidos con brisas generalizadas, totalizando un 52% del total, de modo que la probabilidad de tener o no tener un día de brisa generalizada dado que el día anterior hubo brisa generalizada es muy similar. De los 167 días, hubo 44 eventos de 2 días, 9 de 3, 3 de 4, 1 de 5, 4 de 6 y 1 de 12. Los eventos de brisa generalizada seguidos tienden a durar entre 2 y en menor medida 3 días, habiendo en promedio casi 2 eventos al año de brisas generalizadas de entre 4 y 7 días (Fig. 4.14).

También se realizó el mismo análisis para la estación de CRR, incorporando tanto las brisas puras como las ocultas en el flujo sinóptico. Al estudiar una estación puntual, se observa en primer lugar que el total de eventos aumenta, en particular los eventos de 3 y 4 días y en menor medida los de 5 y 6 días (Fig. 4.14). Mientras que para las puras el evento más común de días seguidos de brisa tiene una duración de 2 días, para el conjunto de puras y ocultas es 5 días. Esto sugiere que es común que ocurran en una estación puntual eventos de entre 2 y 5 días en el que ocurren tanto brisas dominantes como brisas ocultas. Esta duración de días seguidos con brisa es consistente con la escala sinóptica, con pasajes de sistemas de alta presión por Uruguay provocando alrededor de 5 días de brisa pura y/u oculta en una estación pero entre 2 y 3 de forma generalizada.

Por último, se observa un evento de duración mayor que todos los demás. Este fue de 12 días seguidos de brisa generalizada y ocurrió del 6 al 17 de marzo 2015, que a su vez duró 13 días en la estación de Carrasco (Fig. 4.14). La situación sinóptica asociada a este evento se muestra más adelante en este capítulo (Fig. 4.23).

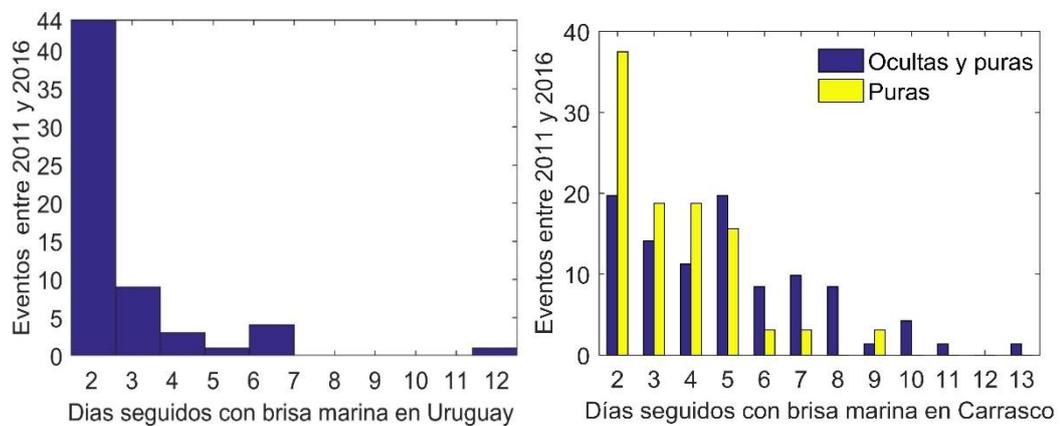


Figura 4.14. Izquierda: Cantidad de eventos de días de brisa marina (pura) generalizada seguidos entre 2011 y 2016. Derecha: Cantidad de eventos de brisa marina seguida en José Ignacio entre 2011 y 2016 para la serie original identificando brisas puras (amarillo) y para la serie diaria filtrada identificando las brisas ocultas en el flujo sinóptico (azul).

4.6. Diferencias entre la brisa marina en el estuario y en el océano

La tabla 4.3 muestra la correlación cruzada entre las estaciones seleccionadas para la matriz de 0s y 1s para los días en los que hubo brisa y los que no en cada estación. Se observa una pérdida de correlación según la distancia entre estaciones. Todas son significativas excepto CHY con las del estuario, y ESM con las del subgrupo 1 del estuario, de modo que el límite de la significancia se ubica entre los subgrupos extremos (todos son significativos entre sí excepto el 1^{er} grupo del estuario con el 2^{do} del océano). A su vez, es interesante observar, a diferencia de lo que sucedía con la temperatura del aire y mar, que los grupos más parecidos en cuanto a brisas son el 2^{do} del estuario y el 1^{ro} del océano, o sea el tramo CRR-JIG, que de hecho son los que se encuentran más cercanos. Esto responde a la distancia entre ellas, dándole consistencia al análisis, y parecería imponerse la variabilidad espacial por sobre el ruido asociado a la toma del dato o la variabilidad de muy pequeña escala asociada a las condiciones cercanas a la estación. (Tabla 4.3; Fig. 4.15).

Tabla 4.3. Correlación de Pearson y *p*-valor entre estaciones utilizando la matriz de salida del Índice de Identificación de Brisas. Cada día se tomó como un evento independiente. Los valores no significativos se marcan en negrita.

	CLN	ARKY	CRR	SLS	PDE	JIG	ESM	CHY
CLN		1,08 ⁻⁵⁰	1,37 ⁻³⁰	2,33 ⁻²⁷	1,75 ⁻⁰⁷	6,37 ⁻¹²	0,01	0,18
ARKY	0,40		4,05 ⁻³⁵	1,06 ⁻⁴¹	1,63 ⁻⁰⁶	5,94 ⁻¹⁰	0,13	0,54
CRR	0,25	0,33		6,50 ⁻⁷⁰	1,10 ⁻⁵⁷	1,33 ⁻⁵⁴	5,11 ⁻¹⁸	0,01
SLS	0,24	0,36	0,37		1,10 ⁻³⁶	3,19 ⁻³⁸	1,82 ⁻¹⁰	0,01
PDE	0,12	0,13	0,34	0,27		3,24 ⁻⁸⁸	9,22 ⁻⁴⁰	2,07 ⁻⁰⁶
JIG	0,15	0,17	0,33	0,27	0,41		6,35 ⁻³⁴	1,09 ⁻¹⁰
ESM	0,06	0,04	0,19	0,14	0,28	0,25		8,66 ⁻²⁴
CHY	-0,03	-0,02	0,06	0,06	0,12	0,16	0,25	

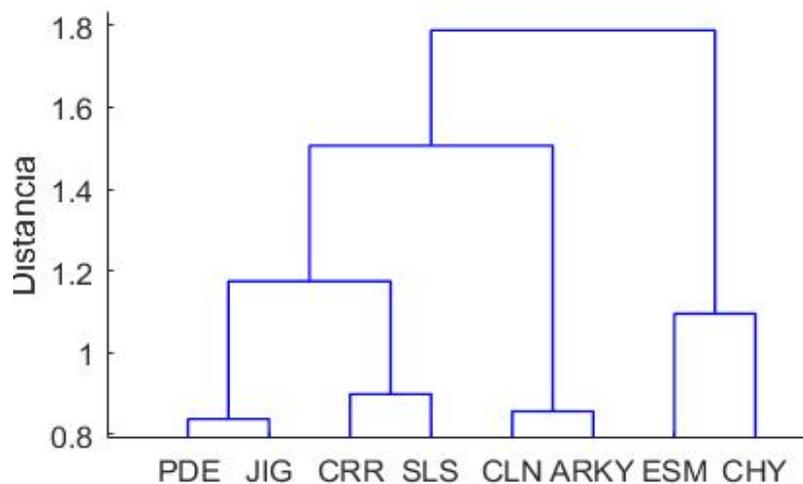


Figura 4.15. Dendrograma del análisis de cluster utilizando el método de Ward para agrupar las estaciones según el índice de identificación de brisa.

El siguiente paso fue agrupar las estaciones correspondientes al estuario por un lado y al océano por el otro, de modo de describir las diferencias entre la brisa marina pura en cada región. Para ello, se tomó el ciclo diario

de los días únicamente en que hubo IIBG positivo y se promediaron las estaciones del estuario y la del océano por hora. Si bien el cluster de días del IIB arrojó que el 2^{do} grupo del estuario es más parecido al del 1^{ero} del océano que todos los demás, no necesariamente ocurre en la caracterización de la estructura del ciclo diario de la brisa. Por el contrario, se separan en forma similar a los cluster de temperatura, módulo del viento y ciclo diario de u y v calculados en el Capítulo 3. Esto sugiere que para la frecuencia y distribución temporal de eventos de brisa PDE-JIG y CRR-SLS son más similares que sus respectivos pares de océano y estuario pero no así para el ciclo diario de vientos (Fig. 4.15).

La figura 4.16 muestra el ciclo diario promedio de los días de brisa diferenciada por las estaciones del estuario con respecto a las del océano. Las variables graficadas son la velocidad del viento ($m.s^{-1}$), la diferencia de temperatura entre el aire y mar ΔT ($^{\circ}C$), y la velocidad del viento *across-shore* ($m.s^{-1}$).

Para graficar los vectores del ciclo diario se calculó u y v promediada horariamente con el que se recuperó la dirección y luego se volvió a calcular u y v con la dirección recuperada y el módulo de la velocidad, de modo de

obtener vectores lo más representativos de la realidad tanto en el valor del módulo como la dirección^{VIII}.

En el océano, la brisa comienza a las 11:00 hs y tiene dirección SE, mientras que en el estuario comienza a las 12:00 y tiene dirección S. El máximo de intensidad promedio de viento alcanzado es similar: 5,57 y 5,49 m.s⁻¹ en el estuario y océano, respectivamente. Mientras que en el estuario el máximo ocurre a las 16:00 hs, en el océano ocurre a las 17:00 hs. A su vez, la brisa en el océano parece ser más persistente en el tiempo, pero es difícil estimar cuando termina, probablemente en algún momento entre las 20 y las 23 hs. Tomando estrictamente los momentos de cambio de signo del ciclo diario de velocidad *across-shore*, la hora de comienzo y final en el estuario es de 11:00 a 22:00 hs, y en el océano sería necesario desglosarlo por tramos, ya que hay más de 30° de diferencia en la orientación de la costa entre PDE y CHY, de modo que el promedio arroja que la velocidad *across-shore* es negativo únicamente entre las 03:00 y las 09:00 hs. El ΔT presenta el mismo comportamiento que el viento en cuanto al desfase del océano con respecto al estuario, solo que cambia de signo entre 1 y 2 horas antes que la velocidad *across-shore*. La temperatura del aire supera a la

^{VIII} Si se promedia u y v por hora y luego se calcula la rapidez, el resultado subestima el valor de rapidez media (módulo de la velocidad) en ese horario debido a que se promedian vectores con signo. Si se promedia la dirección de forma escalar se logran resultados erróneos como se mencionó anteriormente debido al pasaje de 0 a 360°. Por esta razón se calculó el ciclo diario de u y v utilizando la dirección recuperada a partir del promedio de u y v y el promedio horario de la rapidez.

del mar entre las 8:00 y las 9:00 hs hasta las 18:00-19:00 hs en el océano, mientras que en el estuario sucede entre las 9:00 y 19:00 hs. (Fig. 4.16).

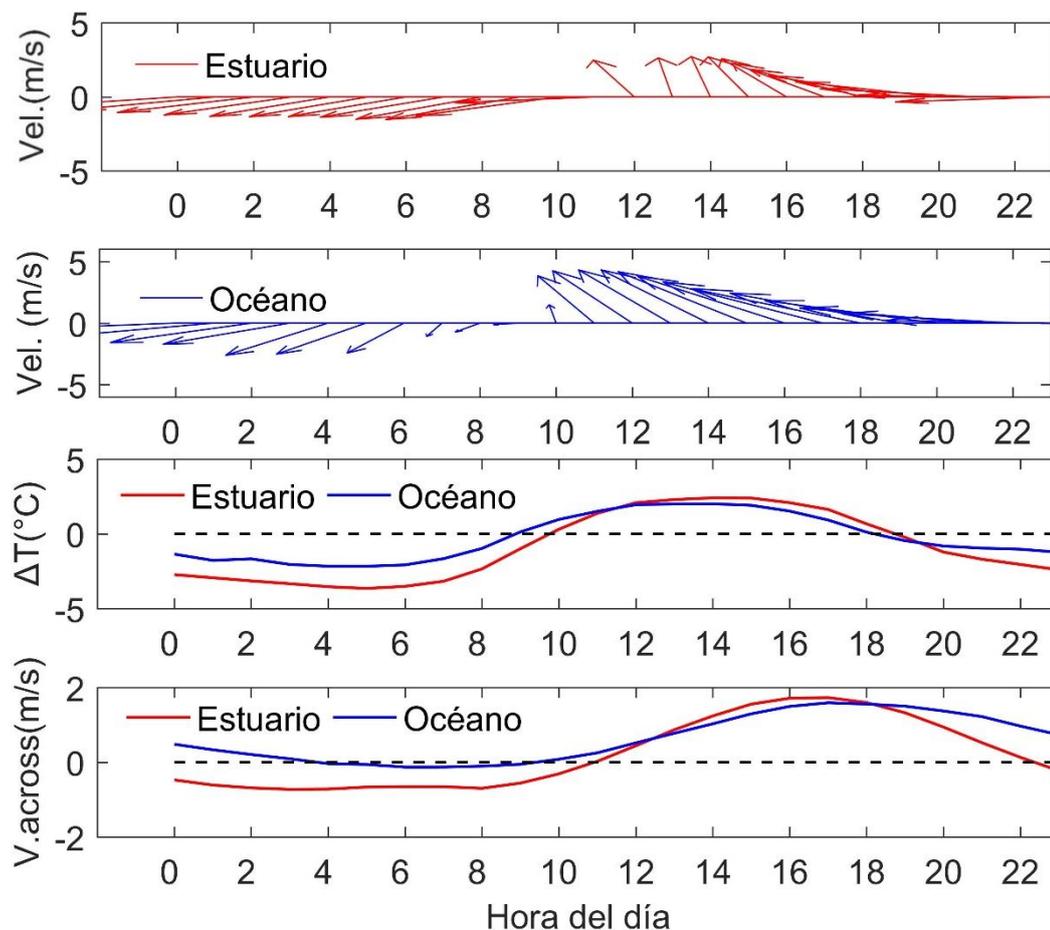


Figura 4.16. Ciclo diario promedio para los días de brisa marina en el Estuario y Océano. De arriba hacia abajo se muestra: La velocidad de viento, la diferencia de temperatura entre el aire y el agua, y la velocidad *across-shore*. El ciclo diario de viento fue calculado promediando las estaciones seleccionadas de cada región, al igual que la velocidad *across-shore*. El ΔT por su parte, es en MV y CRR para el estuario y en BP para el océano.

En base a lo descrito y al marco teórico, el ciclo diario de la brisa marina en Uruguay sería de la siguiente manera:

Comienza el día con un gradiente de presión en superficie en sentido decreciente hacia el mar, debido a que éste se encuentra más cálido que la tierra, con un viento N-NE que sería la suma de una brisa de tierra con el viento prevalente en verano. Al salir el sol, la radiación comienza a calentar tanto la tierra como el mar, pero la tierra se calienta más rápidamente debido a que tiene menor capacidad calorífica. Entre las 09:00 y las 10:00 hs la temperatura del aire sobre la tierra supera a la TSM. Allí se invierte el gradiente de presión, y el viento comienza a rotar en dirección *on-shore*. La diferencia de temperatura entre el mar y el aire sigue aumentando hacia la tarde (aunque a menor ritmo por la brisa) así como el gradiente de presión y en consecuencia la intensidad del viento hasta alcanzar el pico entre las 16:00 y las 17:00 hs, para luego comenzar, más lentamente que el proceso de inicio, a disminuir la diferencia de temperatura, el gradiente de presión y el viento. Al atardecer, la tierra comienza a enfriarse más rápidamente que el mar y comienza nuevamente el proceso. Los valores de las variables que se alcanzan tomando el promedio de la máxima diaria son $7,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad del viento y 5°C de ΔT .

Las diferencias entre la brisa marina en el estuario y el océano (que en el océano comience antes) se deben al grado de acoplamiento que tienen con

la atmósfera y a la orientación de la costa en relación a los vientos prevalentes. El campo de vientos sinópticos prevalentes del NE (22,5°) provoca que para que el viento adquiriera dirección *on-shore* en el estuario es necesario que rote entre 30 y 60° más que en el océano. A su vez, el ΔT necesario para generar la celda de brisa se alcanzaría primero en el océano que en el estuario, debido a que el océano está más frío que el estuario durante el verano.

El efecto de las diferencias entre el acoplamiento del estuario y el océano con la atmósfera también puede observarse a escala climatológica en los promedios mensuales; el ΔT (calculado como el promedio mensual de la máxima diaria de la temperatura del aire – la temperatura media del mar) tiende a ser mayor en el estuario de marzo a agosto donde el estuario se enfría más rápidamente que el océano y desde agosto hasta marzo donde el estuario se calienta más rápidamente. El océano siempre mantiene el desfase de 1-2 meses con respecto al ciclo de insolación debido a la mayor inercia térmica. Estas diferencias en el promedio mensual de ΔT se ven reflejadas en cierta medida en la frecuencia de brisas, que tiende a ser mayor en el estuario de febrero a agosto y en el océano de agosto a febrero. No obstante, las diferencias en la frecuencia de brisas entre el estuario y el océano no son significativas ni en la media anual ni tomando las estaciones del año (T-test; $p > 0,05$). Los únicos meses donde se observan diferencias en la frecuencia de brisa marina mayor al 30% son principalmente

diciembre (37,0%) y en menor medida julio (31,6%), en los que se observan mayor frecuencia en el océano y estuario respectivamente (Fig. 4.17).

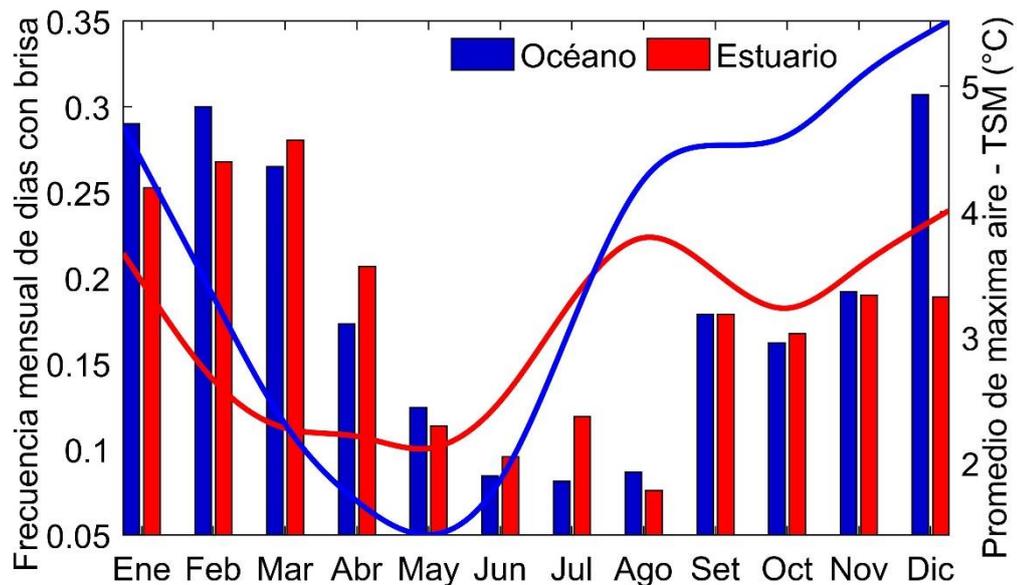


Figura 4.17. Frecuencia mensual de días con brisa en barras y promedio mensual de la diferencia entre la temperatura del mar y la máxima diaria del aire en líneas.

4.7. Condiciones de escala sinóptica que favorecen la brisa

Esta sección tiene como objetivo principal estudiar el contexto sinóptico en el que se desarrolla la brisa marina. La principal variable explicativa utilizada fue la presión atmosférica, medida *in situ* y los campos de presión de ERA-INTERIM. Se buscó identificar umbrales de ocurrencia, así como la causalidad entre los campos de presión regionales con los eventos de brisa marina en Uruguay.

El primer análisis consistió en buscar diferencias en la distribución de probabilidad de valores de la presión atmosférica para los días en los que hubo brisa marina generalizada y en los que no. Para ello se tomaron los datos de presión en Chuy (estación con mayor cobertura de esta variable) y se diferenciaron dos grupos: los datos de presión medidos para días con (sin) brisa generalizada. Luego se construyeron histogramas para ambos grupos generando 30 intervalos entre el valor mínimo y máximo observado y se le ajustó una curva de frecuencia relativa. Todas las curvas se suavizaron con splines cúbicas.

La distribución de la frecuencia relativa de días con brisa marina pura muestra que tienden a tener menor kurtosis, con una distribución acotada a presiones intermedias. Se destaca el hecho de que a valores de presión mayor a 1025 hPa no ocurre la brisa marina. Al graficar la rosa de vientos en Chuy, tomando únicamente los valores de velocidad de viento medidos en simultáneo con presión mayor a 1025 hPa, se observa que durante estos eventos predominan vientos del sur y en menor medida del norte (Fig. 4.18). Si bien estos vientos tienden a ser más intensos que la media, lo que podría evitar el desarrollo de la brisa, también se observan vientos débiles, lo que sugiere que lo que evita el desarrollo de la celda de brisa es la alta presión.

Por otro lado, la climatología de presión media muestra que existe un ciclo estacional de presión con un máximo entre mayo y junio y un mínimo entre

diciembre y enero. A su vez la cantidad de horas por mes en los que se registran los valores superiores a 1025 hPa en los que no se desarrolla la brisa se distribuyen entre abril y noviembre con un máximo en julio-agosto (Fig. 4.18). Esto se debe a que en invierno el anticiclón del Atlántico penetra sobre el continente, mientras que en verano se crea una baja térmica en el continente que “corta” el cinturón de altas presiones (Peterson y Stramma, 1991) .Esto podría ser una de las causas por las que se observa menor frecuencia de eventos de brisa fuera del verano, a pesar de probablemente contar con el gradiente térmico necesario para generar la celda de circulación.

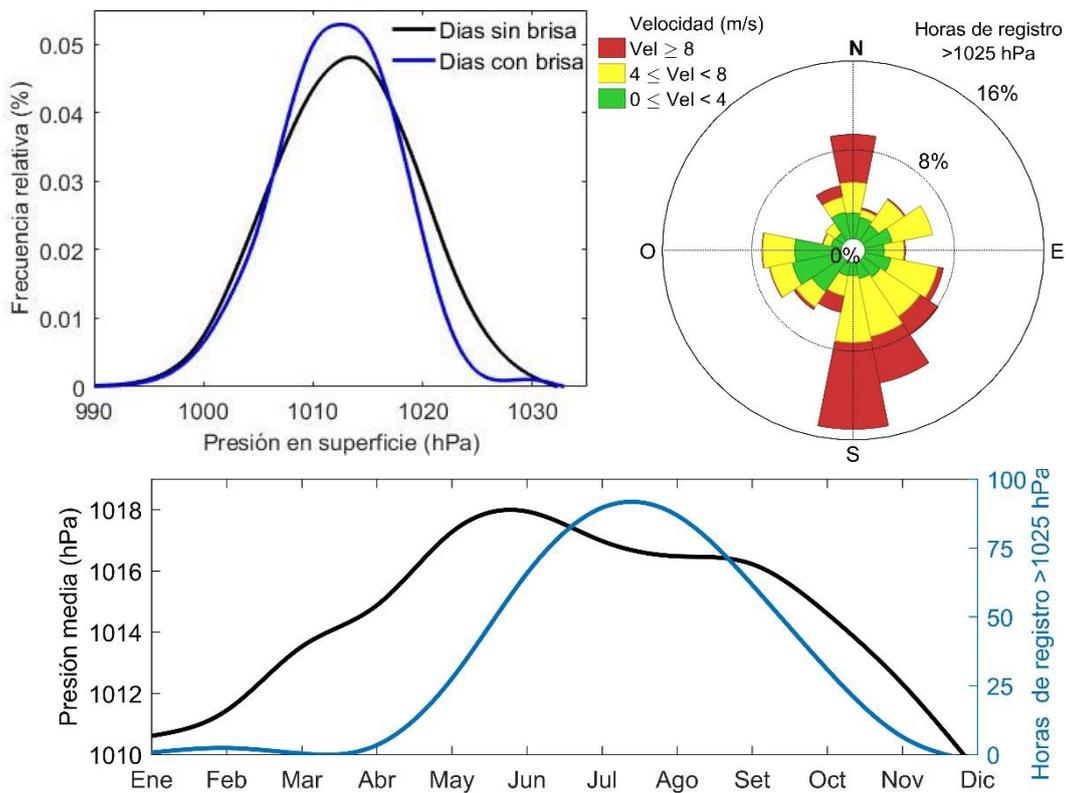


Figura 4.18. Arriba izquierda: Distribución de frecuencias relativas de la presión en superficie durante los días de brisa generalizada y los de no

brisa generalizada para todo el período. Arriba derecha: Rosa de vientos en Chuy para los datos en que se registró en simultáneo presión atmosférica mayor a 1025 hPa en la misma estación. Debajo: Climatología de presión atmosférica y cantidad de horas promedio por mes en el que se registra presión mayor a 1025 hPa en la estación Chuy. Los datos corresponden al periodo 2011-2016.

4.7.1. Condiciones sinópticas para brisas de verano

Dado que los eventos de brisa marina tienden a concentrarse en el verano, y que la dinámica atmosférica en Uruguay es muy diferente entre el invierno y verano, es que se decidió continuar el resto de los análisis en el período diciembre-marzo. Se podría haber utilizado las anomalías para filtrar el ciclo estacional, pero aun así las señales tienden a ser mucho más claras durante el verano, al punto de que en muchos trabajos se tiende a analizar solamente este período (ej. Planchon *et al.*, 2006).

Al analizar la distribución de frecuencias relativas de valores de presión en días con brisa marina generalizada solo para verano, se observa que se da preferentemente a presiones intermedias; altas para el promedio de verano. Los días de brisa generalizada tienen menor kurtosis y la media es 2 hPa mayor (1013 hPa) que los días sin brisa generalizada (1011 hPa). Los valores críticos donde la frecuencia relativa de los días de brisa supera a los de días sin brisa en verano son 1011 y 1023 hPa. Las presiones mayores a 1025 hPa prácticamente no ocurren durante el verano y cuando

lo hacen ocurren no se observan días con brisa marina (Fig. 4.19). El mismo análisis se realizó para el módulo de la velocidad (rapidez) y para la radiación, solo que utilizando todos los datos de las estaciones seleccionadas. Los días de brisa suelen tener una mayor frecuencia relativa del módulo de velocidad entre 0 y 3,8 m.s⁻¹ y menor frecuencia de velocidades mayores. La velocidad media suele ser 0,7 m.s⁻¹ menor los días de brisa, 4,2 contra 4,9 m.s⁻¹. Es interesante observar que los valores mayores a 8 m.s⁻¹ suceden prácticamente siempre los días en los que no hay brisa marina (Fig. 4.19).

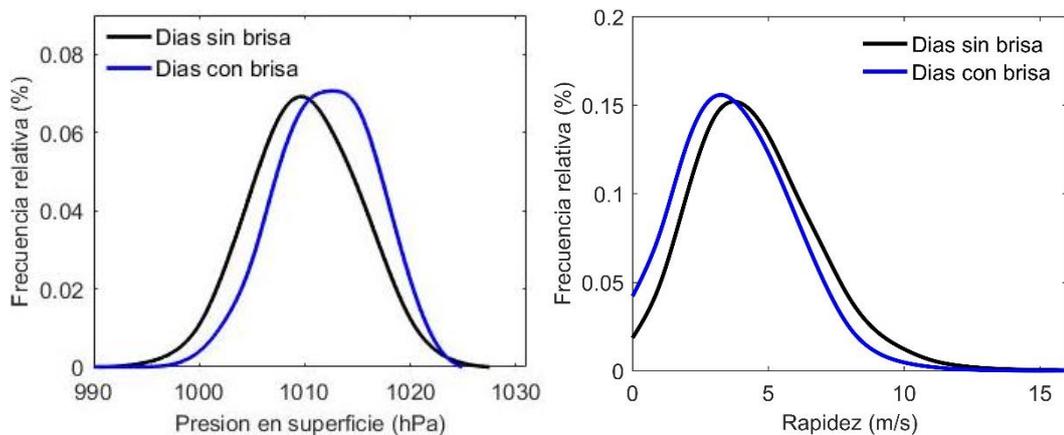


Figura 4.19. Distribución de frecuencias relativas de la presión en superficie (izquierda) y módulo de la velocidad (derecha) para los días de brisa generalizada y los de no brisa generalizada. Los datos corresponden a todas las estaciones seleccionadas con medición durante dic-mar 2011-2016.

Para la radiación solar, si bien la pregunta a responder fue la misma, simplemente se realizó el promedio horario durante el verano para los días

con y sin brisa. La radiación siempre es más alta los días con brisa, alcanzando el máximo de diferencia al mediodía con un promedio de $112 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ con respecto a los días de no brisa, aludiendo que los días de brisa tienden a ser días con cielo más claro, lo cual es consistente con valores mayores de la presión en superficie (Fig. 4.20). La diferencia en la media tanto para la presión, la rapidez y la radiación son estadísticamente significativas (ANOVA; $p < 0,05$). Estos análisis demuestran empíricamente lo descrito en la bibliografía y encuentra valores umbrales para nuestro país, muy similares a los de otros lugares (ej. Azorin-Molina *et al.*, 2011). Los días de brisa se caracterizan por ser de cielo claro, presión intermedia-alta y velocidad de viento entre 0 y $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ capaz de llegar hasta $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

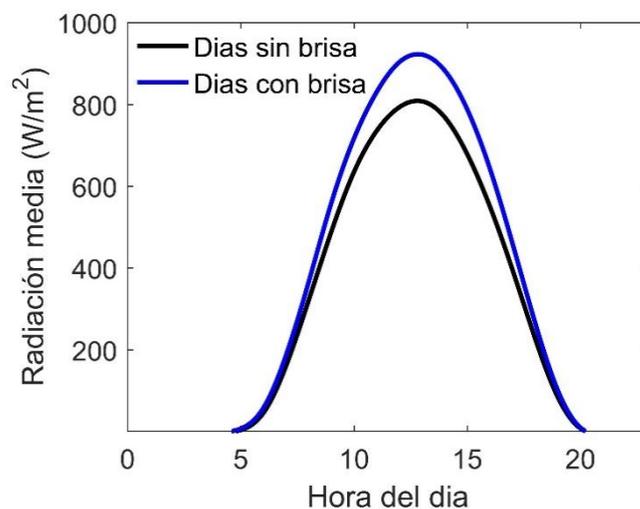


Figura 4.20. Radiación promedio según la hora del día para los días con brisa generalizada y sin brisa generalizada. El máximo es al mediodía con una diferencia promedio de $112 \text{ W}/\text{m}^2$ mayor los días de brisa. Los datos corresponden a todas las estaciones seleccionadas con medición durante el periodo dic-ene 2011-2016.

Dada la importancia que tiene la presión en superficie del mar (PSM) para el desarrollo y distribución de días con brisa marina generalizada, se estudió la relación entre los campos de presión en superficie del reanálisis ERA-INTERIM y los días de brisa generalizada, tomando como se mencionó anteriormente el periodo diciembre a marzo entre 2011 y 2016.

La figura 4.21 muestra una correlación positiva y significativa entre el IIBG y las anomalías de PSM sobre Uruguay y todo el océano argentino, de modo que tiende a haber anomalías de alta presión en esta región durante los días en los que hay brisa marina en Uruguay. El composite de todos los eventos muestra que la anomalía promedio del centro de presión es mayor a 1,5 hPa, y la diferencia *across-shore* en Uruguay es cercana a 1hPa en todo el país, (Fig. 4.21). La figura 4.22, que muestra la correlación de los eventos de brisa con los campos de presión superficial 1 y 2 días antes y después, describe el lento desplazamiento de oeste a este del centro de alta presión sobre Uruguay y el Océano Atlántico Sudoccidental, responsable de generar condiciones de brisa marina en Uruguay, la cuales tienden a durar más de un día (Fig. 4. 22). Esto provoca un gradiente *across-shore* débil y decreciente hacia la tierra en la costa uruguaya con vientos sinópticos asociados con dirección del NE. A modo de ejemplo, las figuras 4.23 y 4.24 muestran 2 eventos de brisa marina durante varios días; un evento de 4 días y el otro de 12 días, siendo este el más largo registrado.

Se observa que el sistema de alta presión sobre el océano adyacente y el gradiente débil está siempre presente. El primer caso parece corresponder a una situación de bloqueo intenso, mientras que el de 12 días tiene componentes transientes y de bloqueo.

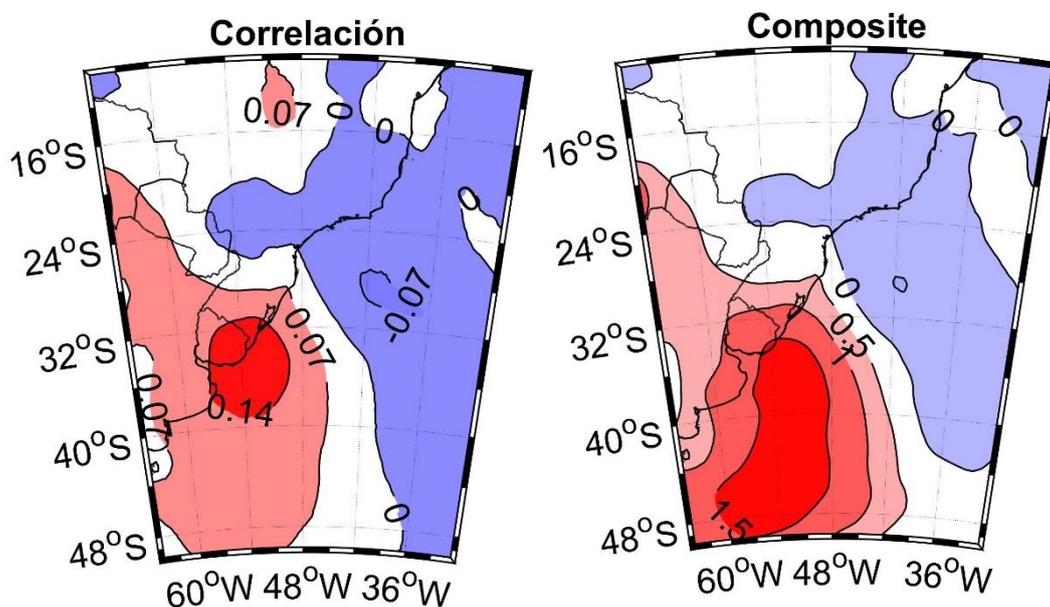


Figura 4. 21. Izquierda: Correlación lineal entre la presión en superficie del mar y el índice binomial de Identificación de Brisa Generalizada (IIBG, 1, día de brisa, 0 día de no brisa) en verano (dic-mar) entre 2011 y 2016. La correlación mayor a $|0,07|$ es significativa y se ubica principalmente en Uruguay y el Atlántico Sudoccidental frente a Argentina (t-test, $p < 0,05$). Derecha: Composite de anomalía de presión atmosférica a nivel del mar (hPa) para los días de Índice de Brisa Generalizada positivo en verano (dic-mar) entre 2011 y 2016. Datos de media diaria de ERA-INTERIM con resolución $0,25^\circ$.

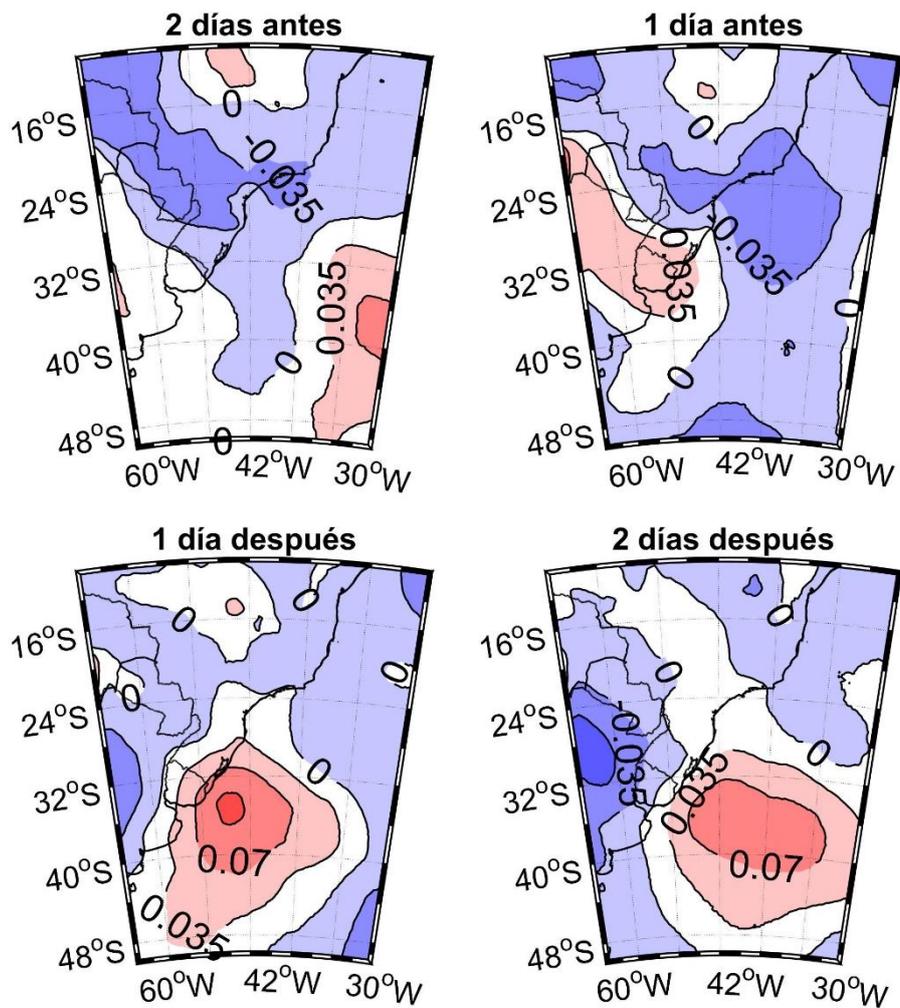


Figura 4.22. Correlación lineal de la presión en superficie del mar desfasada hasta 2 días antes y después respectivamente con el índice bimodal de Identificación de Brisa Generalizada (IIBG, 1, día de brisa, 0 día de no brisa) en verano (dic-mar) entre 2011 y 2016. La correlación mayor a $|0,07|$ es significativa y se ubica principalmente en los dos días después del evento. Datos de media diaria de ERA-INTERIM con resolución $0,25^\circ$.

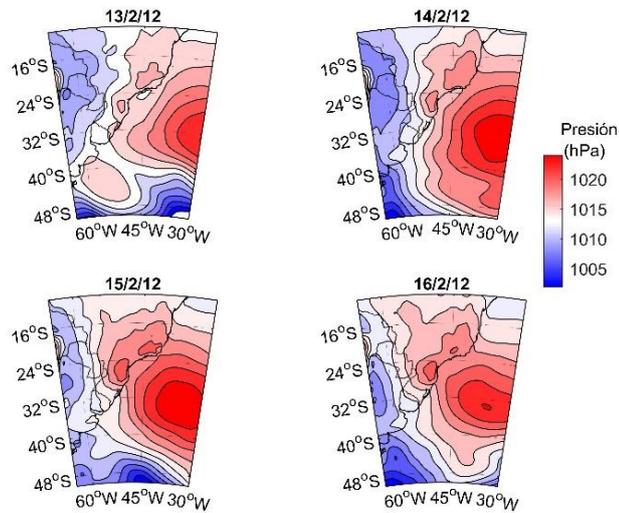


Figura 4.23. Secuencia de Presión Superficial del Mar en el Atlántico Sudoccidental para un evento de 4 días de brisa marina generalizada en Uruguay del 13 al 16 de febrero de 2012. Los contornos son cada 2 hPa.

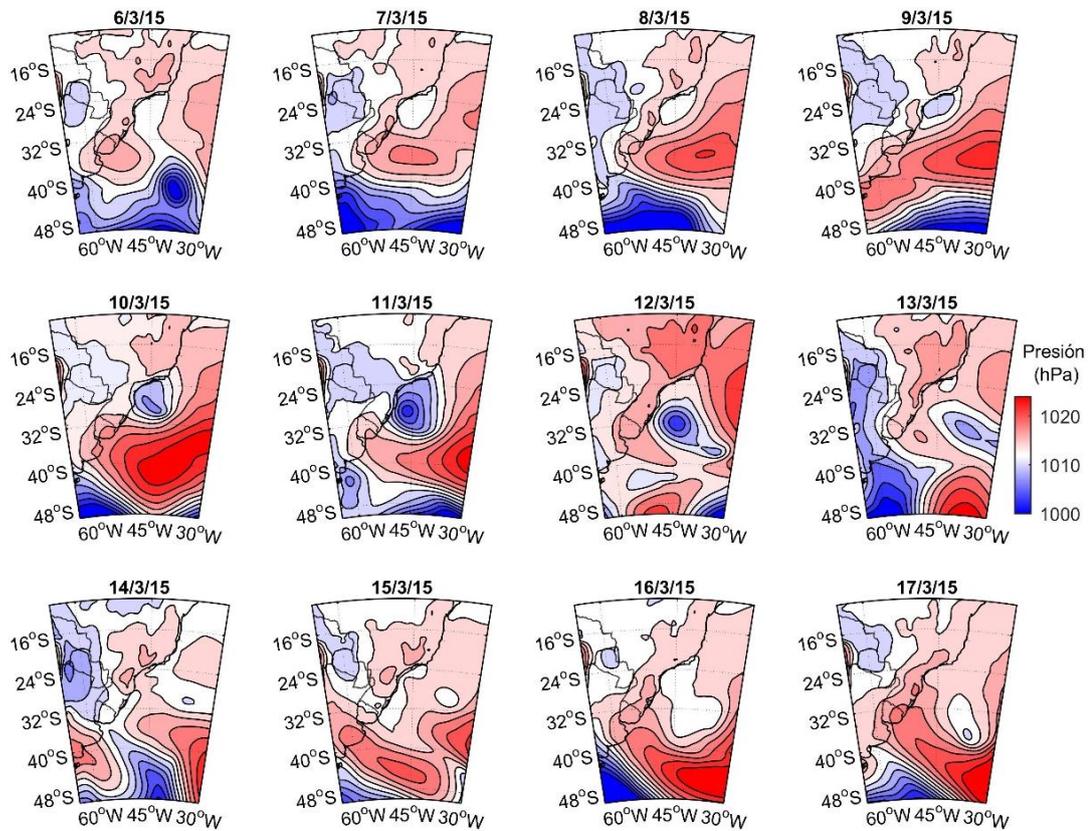


Figura 4.24. Secuencia de Presión Superficial del Mar en el Atlántico Sudoccidental para un evento de 12 días de brisa marina generalizada en Uruguay entre el 6 y el 17 de marzo de 2015. Los contornos son cada 2 hPa. Datos de ERA-INTERIM.

Las figuras anteriores (Figs. 4.21 a 4.24) sugieren que no sólo el valor de la PSM sino también su gradiente horizontal es importante para el desarrollo o no de la brisa marina. Para estudiarlo se tomó la PSM de ERA-INTERIM en dos puntos y nuevamente todos los años del período diciembre a marzo: un punto ubicado en el centro del país (33°S, 56°W) y otro en el Océano Atlántico (36°S, 53°W) de manera que se localizan aproximadamente perpendicular y equidistantes a la costa atlántica uruguaya (Fig. 4.25). Con la PSM en estos puntos a su vez se construyó un Índice de Gradiente de Presión (IGP) como indicador de la intensidad del gradiente de presión:

$$IGP = PSM_{océano 36^{\circ}S, 53^{\circ}W} - PSM_{tierra 33^{\circ}S, 56^{\circ}W} \quad (4.8)$$

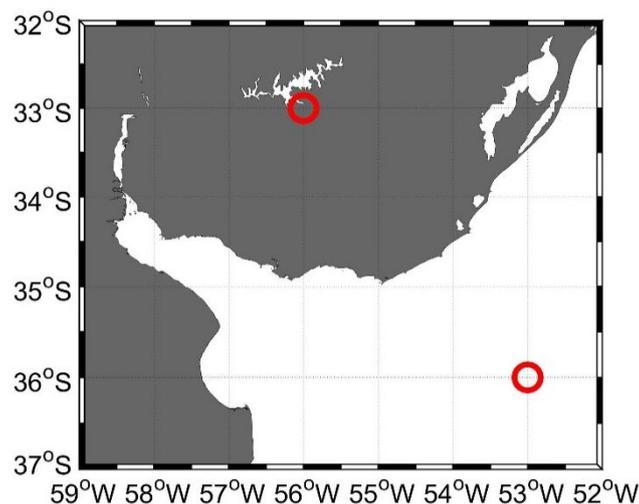


Figura 4.25. Localización de los puntos utilizados para calcular el Índice de gradiente de presión con los datos de presión superficial del mar del

reanálisis ERA-INTERIM. El índice se calcula como la resta del valor en punto del Océano Atlántico (36°S, 53°W) menos el del punto ubicado en el centro del país (33°S, 56°W).

Con el IGP, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para explorar si existen diferencias significativas en la media del gradiente de presión debido al factor brisa. Se realizó tanto para el IGP como para el valor absoluto del IGP, y así poder determinar la significancia tanto de la intensidad del gradiente de presión como de la intensidad y el signo. Se observan diferencias significativas entre la media del valor absoluto de IGP ($p < 0,05$; $\mu = 0,8$ y $0,4$ hPa) para días de brisa y no brisa respectivamente. En el caso del valor del IGP (con signo) las diferencias son marginalmente significativas ($p = 0,07$; $\mu = 1,4$ y $2,1$ hPa) para días de brisa y no brisa respectivamente (Fig. 4.26). Se observa a su vez, que los valores máximos de gradiente de presión ocurren durante días sin brisa marina y que este evento queda acotado principalmente a gradientes de entre 0 y 2hPa, donde se ubican los intervalos de confianza. Estos análisis permiten demostrar por un lado, que el gradiente de presión en el que se generan los eventos de días de brisa marina es significativamente más débil que aquellos días sin brisa, y que a su vez este gradiente tiende a ser marginalmente significativo más positivo los días de brisa que los de no brisa.

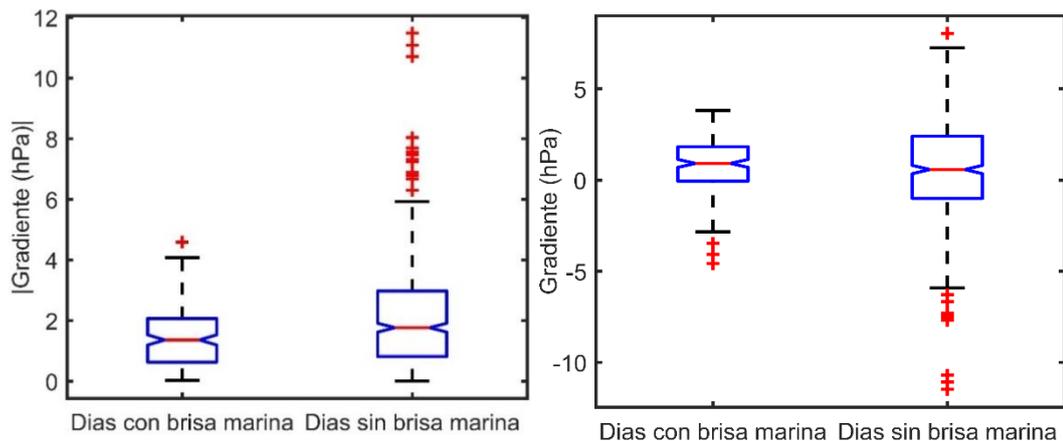


Figura 4.26. Diagrama de cajas del análisis de varianza (ANOVA) de una vía para el gradiente de presión en superficie del mar entre 36°S, 53°W y 33°S, 56°W y el factor día con (sin) brisa marina generalizada en Uruguay durante el periodo diciembre a marzo de los años 2011 al 2016 (n=728). A la izquierda se muestra el análisis utilizando el valor absoluto del gradiente de presión ($p < 0,05$) mientras que a la derecha el valor ($p = 0,07$). Datos de ERA-INTERIM, media diaria con resolución 0,25°.

4.8. Nubosidad asociada al Frente de Brisa vista por satélite

Uno de los objetivos específicos planteados fue responder preguntas sobre la nubosidad asociada al frente de brisa, como la frecuencia de ocurrencia, penetración tierra adentro, etc. Para ello se utilizaron dos aproximaciones, una utilizando las imágenes de archivo y otra realizando composites sobre algunas imágenes en formato numérico a las que se pudo acceder.

4.8.1. Frentes de brisa en imágenes del canal visible

Las imágenes de archivo corresponden a los satélites meteorológicos geoestacionarios GOES disponibles en la página web del Instituto de Pesquisas Espaciais Brasileiro (INPE, <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>). En general se cuenta con una imagen cada media hora, en diferentes canales y cubriendo la totalidad de Uruguay. Se prefirió el archivo de GOES 13 en el canal visible ya que son de mejor resolución que los anteriores (GOES-12 y otros). Estas imágenes están disponibles desde 2015.

La metodología consistió en seleccionar 60 días al azar de días con brisas generalizadas y 60 días al azar sin brisas generalizadas, siempre en el periodo diciembre-marzo. Se buscó que en la secuencia diaria de imágenes se forme una línea de cúmulos en horas cercanas al mediodía en la costa, crezcan y penetren tierra adentro en la tarde, como realizó Planchon *et al.* (2006). De los 120 días analizados, se encontró el frente de brisa (FB) en 33 casos cuando había IIBG+ (55%) y 11 cuando había IIBG- (18%), por lo que en algo más de la mitad de los días de verano con brisa generalizada se puede observar este fenómeno. Los días con IIBG+ en los que no se vio el frente de brisa fueron 27(45%) y los días sin frente de brisa IIBG- fueron 49 (82%, Tabla 4.3) Algunas imágenes de días analizados se muestran en la figura 4.26. Estos fueron casos en los que se observó el frente de brisa. Se observa la penetración de la nubosidad que marca el ingreso del FB

tierra adentro en el correr del día. En general primero penetra en la costa de Rocha y luego en el resto del país. La distancia recorrida suele ser mayor entre las 18:30 y las 20:00 UTC que de las 17:00 a las 18:30 UTC. Al analizar las imágenes, también se observa que en una alta proporción de días el FB es modificado fuertemente por el flujo sinóptico, de modo que puede llegar a tener una forma y penetración muy distinta a los días de flujo sinóptico suave donde se puede asumir que la penetración del FB es consecuencia casi exclusiva del gradiente de presión generado por la celda de brisa (ej. mayor penetración tierra adentro con vientos del 2^{do} y 3^{er} cuadrante). En general, si la humedad no es suficientemente alta, no se forman las nubes por lo que no es posible ver el FB por satélite, y un flujo sinóptico opuesto a la dirección de la brisa marina genera un frente más definido (Estoque, 1962).

Tabla 4.3. Cantidad y porcentaje de días en los que se identificó la nubosidad asociada al frente de brisa (FB) según 60 días tomados en verano al azar donde el índice de brisas generalizadas (IIBG) fue positivo y 60 días al azar en verano donde fue negativo.

	IIBG+	IIBG-
FB+	33 (55%)	11 (18%)
FB-	27 (45%)	49 (82%)

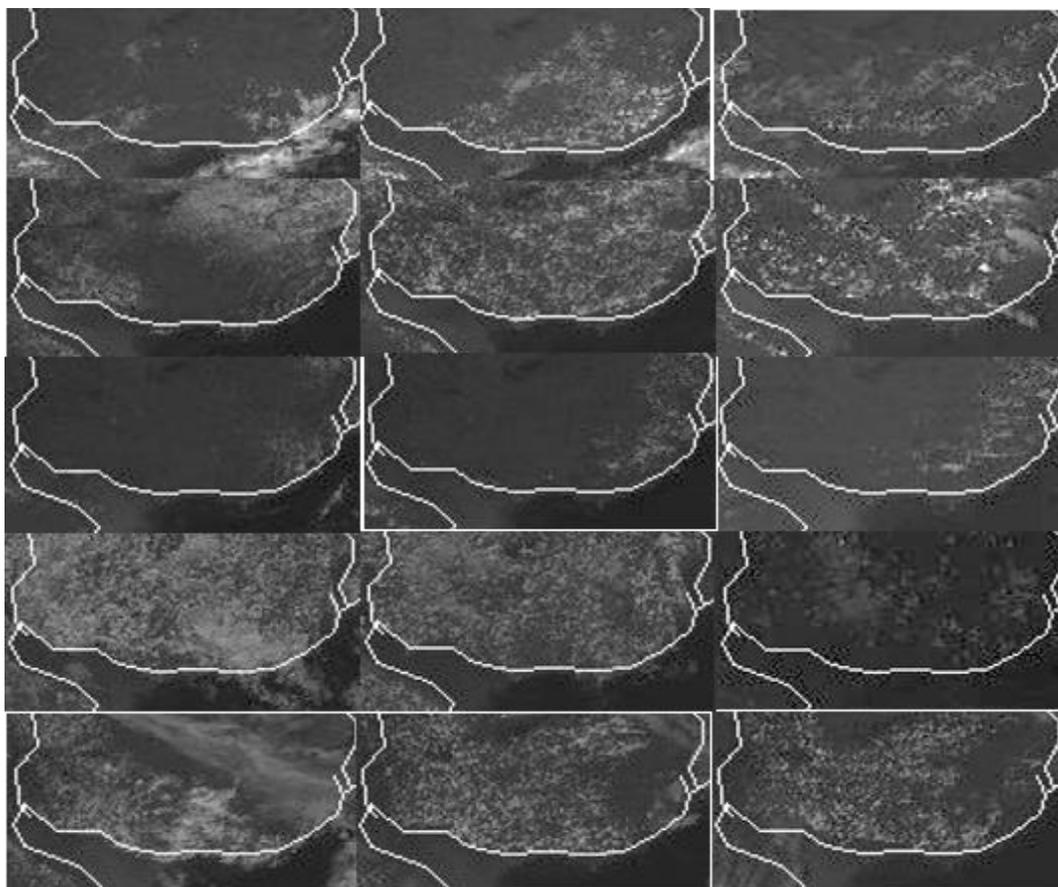


Figura 4.27. Imágenes satelitales de GOES13 en la costa uruguaya en el canal visible a las 15:00, 18:30 y 20:00 UTC (de izquierda a derecha) para los días 29/02/2016, 22/03/2016, 30/01/2016, 22/03/2015 y 24/01/2015 (arriba hacia abajo). Se observa la nubosidad asociada al frente de brisa marina penetrar tierra adentro hacia la tarde.

4.8.2. Frentes de brisa detectados por reflectancia planetaria

La otra aproximación para estudiar el FB consistió en utilizar los datos de reflectancia planetaria (%) como medida de densidad nubosa. Estos archivos medidos por el canal visible del satélite GOES fueron procesados y proporcionados por el Laboratorio de Energía Solar (<http://les.edu.uy/>).

La reflectancia planetaria permite identificar la nubosidad asociada al frente de brisa (FB) los días de cielo claro donde se generan nubes en tierra a partir del mediodía. La figura 4.28 muestra el composite de la reflectancia planetaria para 25 días con brisa marina a las 16:37, 18:37 y 20:37 UTC. Los días fueron seleccionados de la siguiente manera:

- IIBG positivo
- Reflectancia planetaria media $<25\%$ en el área de estudio ($33,5^{\circ}\text{S}$ - 35°S ; 53°W - 59°W) a las 16:37 UTC

Los días seleccionados pueden encontrarse en el Anexo II. El FB se localizó como la isolínea de reflectancia planetaria de 16% más cercana de la costa. Este valor coincide aproximadamente con el límite inferior de reflectancia planetaria de los cúmulos, aunque dicho límite podría ubicarse entre 15 y 20%. Estos límites se definieron comparando con las imágenes con la reflectancia planetaria de esta serie de datos, aunque en general el límite de 15% puede tomarse como el comienzo de las nubes (Hartmann, 2015) ya que un suelo con vegetación como el de Uruguay, sin hielo ni nieve no suele superar ese valor. El método permite seleccionar los días en que al menos la mitad de las estaciones registraron un evento de brisa y a su vez que este evento no tuviera alta cobertura nubosa asociada a un sistema sinóptico que no permitiera identificar el desarrollo de los cúmulos asociados al FB.

Como se describió en la sección anterior para 5 casos, los cúmulos asociados al FB se forman en la faja costera a partir del mediodía, y luego crecen y penetran tierra adentro en el correr de la tarde para luego disiparse, (en el Anexo 1 se muestra algunas fotografías desde superficie). El FB tiende a aparecer primero y más claro en la costa atlántica, donde a su vez tiende a formarse mayor nubosidad. El composite para 25 días con brisa generalizada muestra que a las 16:37 UTC el FB ya penetra cerca de 20-30 km a lo largo de la costa excepto en Montevideo y Maldonado donde tiende a estar más cercano a la costa. A las 18:37 hs aumenta la nubosidad y recorre entre 10 y 20 km tierra adentro más que con respecto a las 16:37. Finalmente entre las 18:37 hs y las 20:37 hs se da la mayor velocidad del FB recorriendo mayor distancia que con respecto a las 2 horas anteriores alcanzando una penetración máxima tierra adentro de entre 50 y 60 km a lo largo de la costa. Luego de las 20:37 hs UTC las imágenes pierden nitidez debido a la caída del sol, pero se puede observar que el frente continúa penetrando tierra adentro y la nubosidad es cada vez más difusa. En la región con mayor relieve en la costa de Maldonado se observan dos núcleos de mayor densidad de nubosidad, uno a 30 km de la costa probablemente debido al efecto de los cerros que retienen nubosidad y otro a 50-60 km acompañando el resto del FB. (Fig. 4.28).

La velocidad y penetración tierra adentro del FB encontrada es consistente con la bibliografía (ej. Simpson, 1994). La velocidad del FB tiende a ser proporcional y menor que la velocidad del viento registrada *in situ*,

acelerándose con el correr de la tarde, contemplando tanto el relieve como las diferencias en el ciclo diario de diferencia de temperatura entre el estuario y la costa atlántica mencionadas anteriormente (Fig. 4.28).

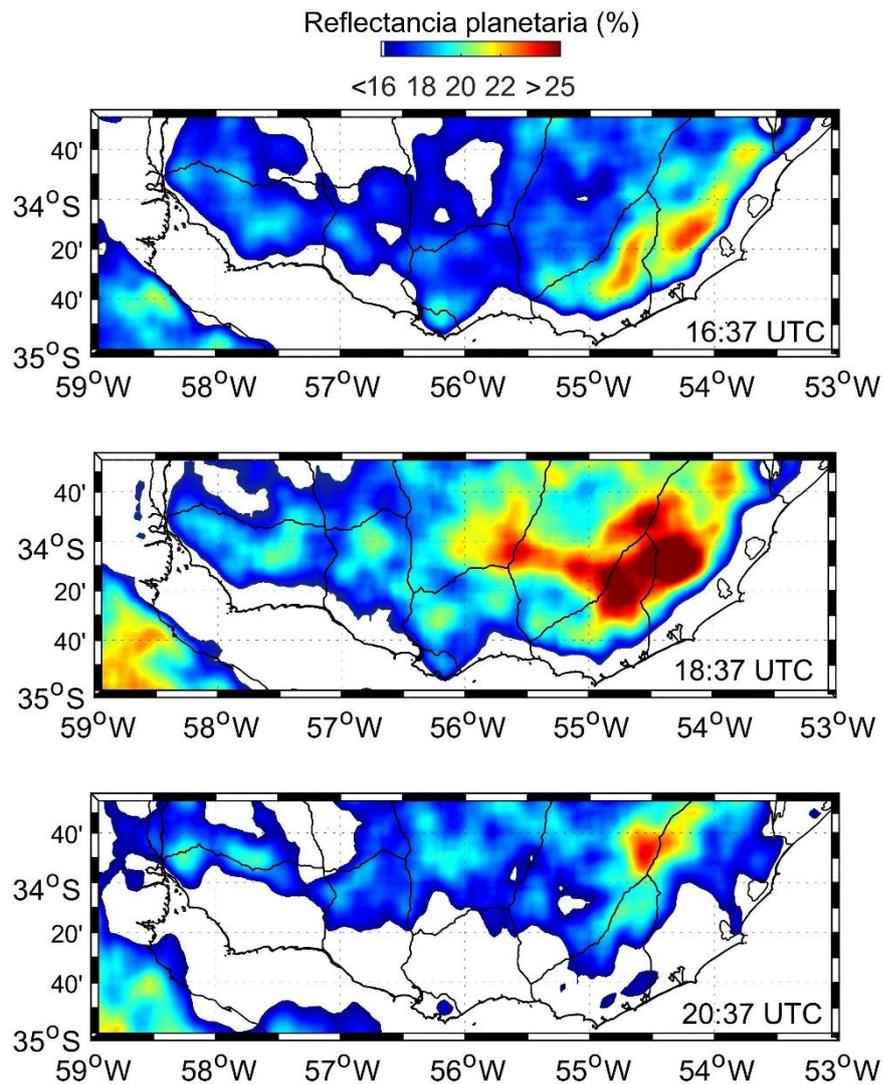


Figura 4.28. Composite de reflectancia planetaria (%) para 25 días identificados con brisa marina generalizada a las 16:37, 18:37 y 20:37 UTC de arriba hacia abajo respectivamente. La reflectancia planetaria menor a 16% está saturada con color blanco y la mayor a 25% en rojo. La Isolínea de 16% paralela a la costa (donde comienza el azul) está asociada con el

comienzo de nubes de espesor considerable tipo cúmulos los cuales marcan la posición del frente de brisa, el cual se desplaza tierra adentro y pierde definición hacia el atardecer. Datos del satélite GOES.

4.9. Conclusiones

Ocurren 60 días de brisas al año donde la brisa marina domina el flujo atmosférico, y otros 60 donde está oculta en el flujo sinóptico. De los 60 dominantes, 30 ocurren en verano (diciembre-marzo) y 30 en el resto del año. De los 60 ocultos, 20 ocurren en verano y los otros 40 en el resto del año.

El promedio anual de brisas por estación es similar al de brisas generalizadas, en torno al 15%, por lo que cuando se da un evento de brisa tiende a darse en la mayor parte de la costa uruguaya.

La variabilidad interanual suele ser baja, cercana a los 7 días (10%), con años en los que se dan hasta 11 días de diferencia con la media. Esta variabilidad está determinada principalmente por los eventos que ocurren en el periodo noviembre-marzo y, en particular, los años con mayor cantidad de brisas presentaron varios eventos en los meses de marzo y/o noviembre.

Los días de brisa marina se caracterizan por ocurrir con cielo claro (alta radiación), presión intermedia (alta con respecto a la media de verano, 1006-1023 hPa), y gradiente de presión débil en general creciente hacia el

mar (0 a 2 hPa.430 km⁻¹) y velocidad de viento entre 0 y 7 m.s⁻¹ capaz de alcanzar hasta 9 m.s⁻¹.

A presiones mayores a 1025 hPa, la brisa marina no se desarrolla. Estas presiones suelen ocurrir entre abril y noviembre y estar asociadas con sistemas sinópticos con vientos del sur y en menor medida del norte.

La temperatura del aire supera a la del mar entre las 09:00 y las 19:00 hs y la brisa comienza antes en el día, entre las 11:00 y las 12:00 hs. La hora de finalización de la brisa es difícil de determinar, cercano a la caída del sol. Los valores típicos que alcanzan las variables son: Velocidad máxima promedio de 7,1 m.s⁻¹ y ΔT de 5°C.

Existen diferencias en las características y distribución de brisas en los extremos de la costa. Colonia y Artilleros y Esmeralda y Chuy tienden a comportarse en forma independiente unas de las otras en cuanto a la ocurrencia de brisas, mientras que todas las demás estaciones están significativamente correlacionadas.

La mayor diferencia entre la brisa marina en el estuario y el océano es que en el océano comienza antes, es más persistente y tiene dirección SE mientras que en el estuario comienza después y tiene dirección S. Esto se debe a la orientación de la costa en relación a los vientos prevalentes del NE y el grado de acoplamiento océano-atmosfera que es mayor en el estuario.

Se pudo observar una tendencia, aunque no significativa, a mayor frecuencia de brisas en el estuario entre febrero y agosto y en el océano entre agosto y febrero, directamente relacionado con los meses en los que el ΔT es mayor en uno que en el otro.

Existe una correlación significativa entre los días de brisa marina y anomalías positivas de presión en superficie del mar en Uruguay y el océano argentino, asociado con el ingreso de un sistema de alta presión al sur de Uruguay cuyo centro tiende a trasladarse de oeste a este, generando vientos sinóptico del NE en Uruguay y un gradiente de presión *across-shore* débil y decreciente tierra adentro. La baja térmica generada en el continente en verano probablemente también colabore en generar esta configuración de los campos de presión superficial del mar. Este fenómeno tiende a durar cerca de 5 días, generando brisas puras y brisas ocultas en la costa de Uruguay. A su vez se observó un evento de 12 días de brisa generalizada asociado a un bloqueo atmosférico en el Atlántico Sudoccidental.

En algo más de la mitad de los días con brisa generalizada, se observa nubosidad asociada al frente de brisa, que penetra tierra adentro y pierde definición alcanzando un máximo cerca de entre 50 y 60 km de lejanía de la costa al atardecer. En estos días, el frente de brisa se puede identificar como una línea paralela a la costa con valores de entre 15 y 20 % de reflectancia planetaria a partir del mediodía.

5. LA BRISA EN ALTA RESOLUCIÓN EN JOSÉ IGNACIO

El objetivo de este capítulo fue estudiar la brisa con la mayor resolución posible, evitando el ruido asociado a la variabilidad espacial y a la variabilidad asociada a la toma de datos de cada estación. Para ello se tomó la estación de JIG, ya que cuenta con resolución temporal de 10 minutos y 2 a 4 medidas en la vertical, y a 5 km se cuentan con mediciones de viento y temperatura del mar. En algunas ocasiones se incorporaron a su vez variables de otras estaciones cercanas que JIG no disponía, como humedad y el cálculo de punto de rocío, siempre dentro del tramo del subgrupo 3 entre Punta del Este-La Paloma (el 1^{ero} en el océano) e inclinación de la costa de 30° (Fig. 5.1).

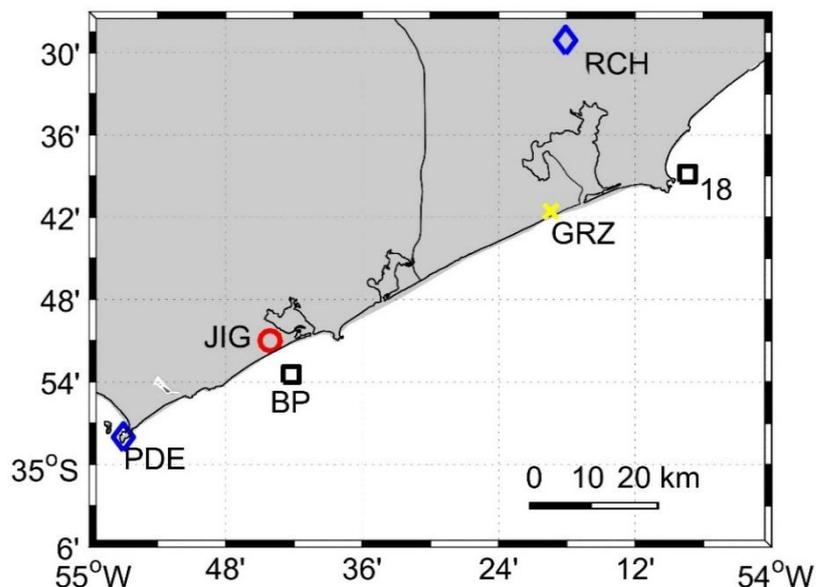


Figura 5.1. Región de la costa atlántica seleccionada para el estudio de brisa con alta resolución. El círculo rojo indica la posición de José Ignacio (JIG), estación de referencia. Se observan otras estaciones cercanas en

azul y amarillo, mediciones de temperatura del mar en negro, y las lagunas costeras de la zona y el límite departamental entre Maldonado y Rocha.

5.1. Índice de Identificación de Brisas en GFS y ERA-INTERIM

El único análisis que se hizo en esta tesis en relación al desempeño de los modelos de circulación global en representar la brisa fue evaluar IIB en el punto de la estación de José Ignacio para GFS y ERA-INTERIM para un período en el que se disponían datos entre el 1 de Enero y el 31 de Marzo de 2015 utilizando las 15:00 y las 09:00 hora local (UTC -3) a 10 m de altura para el índice. GFS cuenta con resolución horizontal de 27 km y ERA-INTERIM $0,125^\circ$ (~13 km). Ambos subestimaron la cantidad de brisas en relación a los datos *in situ*. Mientras que en ese periodo en JIG se encontraron 20,7% de días con brisa, en GFS 12,7% y en ERA-INTERIM 2,8%. En cuanto al módulo de viento, los valores simulados fueron muy similares a los observados, a pesar de que se esperaba de que fueran menores debido a la simulación de un gradiente térmico más débil provocado por el límite de resolución. Sería interesante diagnosticar la causa de la subestimación de brisas de estos modelos, probablemente debido a la necesidad de mayor resolución que tenderá a aumentar en el futuro en conjunto con el poder computacional, pero dicho objetivo excede a los límites de esta tesis.

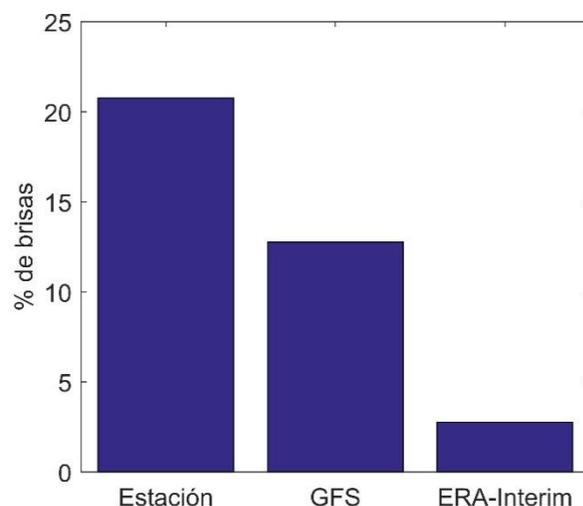


Figura 5.2. Porcentaje de días con brisa identificados para el mismo punto en José Ignacio identificado por los datos *in situ* (Estación), y los análisis de los modelos Global Forecast System (GFS) y ERA-INTERIM con el máximo de resolución entre el 1 de enero de 2011 y 31 de marzo de 2015.

5.2. Estudio de casos

Para identificar cambios en periodos cortos de tiempo y a su vez en altura se graficaron velocidad y dirección de viento a diferentes alturas, temperatura, humedad, punto de rocío, radiación y presión para 6 días con brisa marina previamente identificada entre el 11 y 16 de enero de 2013 en JIG y GRZ (Fig. 5.3). La primer característica que se observa es el viento prevalente del NE durante la noche y la madrugada y del SE en la tarde. Este viento del SE está asociado a la brisa marina. El viento es menor a 5 m.s^{-1} en la mañana y mayor a 5 m.s^{-1} en la tarde. El módulo de la velocidad presenta un comportamiento en el que existe una cortante vertical mayor

en la noche, y tiende a disminuir en toda la columna por la mañana hasta el mediodía cuando los vientos son mínimos con una disminución importante en 40 y 98 m. Con el comienzo de la brisa marina los vientos en altura aumentan más rápido que los de superficie debido a que en superficie aparece el efecto de la fricción, y esto genera una estratificación vertical. Este comportamiento es esperable pues durante la noche la superficie se enfría más rápido que el aire en altura lo cual puede generar una inversión térmica y una atmósfera muy estable. Esto disminuye el intercambio de momento entre la superficie y altura disminuyendo la velocidad del viento en superficie y aumentando los vientos en altura. Durante el día la capa límite se vuelve inestable y existe un eficiente intercambio de momento en la dirección vertical lo cual aumenta los vientos en superficie a expensas de los vientos en altura (Hartmann, 2015). Hacia la tarde la estratificación vertical se vuelve más intensa, con una diferencia máxima de hasta 8,5 contra 2,2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a la media noche del 11 de enero entre lo registrado a 98 y 12 metros de altura, respectivamente. La dirección, si bien rota a lo largo del día, tiende a hacerlo en simultáneo en toda la columna. El ingreso de la brisa ocurre en los diferentes días a las 11:40, 12:20, 10:00, 10:10 y 12:20 y está determinado, por una rotación casi instantánea de la dirección del viento en sentido horario (*on-shore*) de al menos 45° , una caída abrupta en la temperatura de cerca de 2°C , así como un aumento en la humedad y temperatura de punto de rocío de hasta 25% y 4°C , respectivamente. El patrón de temperatura también se observa

en altura, aunque con cambios menos abruptos a mayor altura. La radiación tiende a tener una curva sin depresiones ligadas al pasaje de nubosidad en la mayoría de los días, asociado con días soleados. Es interesante ver como en el 11, 13 y 15 la poca nubosidad que hay ocurre cercana al ingreso de la brisa y en horas de la tarde. Esta nubosidad podría estar asociada a los cúmulos generados por la entrada del frente de brisa. El 12, 14 y 16 fueron días con mayor nubosidad, la cual también se concentró mayormente en la tarde. La presión se ubicó en valores intermedios, entre 1020 y 1010 hPa decreciendo del 11 al 16. La figura 5.4 muestra a su vez los vectores de velocidad de viento, tanto para la serie original, como la serie filtrada por la media móvil de 24 horas y la resta de ambas para obtener la serie diaria. Se puede observar el viento del NE asociado al sistema sinóptico, y a su vez en el ciclo diario un viento suave de tierra y nuevamente la brisa marina al mediodía, solo que con una dirección más SE que E (como en la serie original) debido a que en este caso tiende a ser modificada por el flujo sinóptico (Fig. 5.4). La secuencia de presión superficial del mar muestra un gradiente de presión débil y decreciente hacia tierra en el eje *across-shore* consistente con el análisis del capítulo anterior y con los datos observados *in situ* (Fig. 5.5).

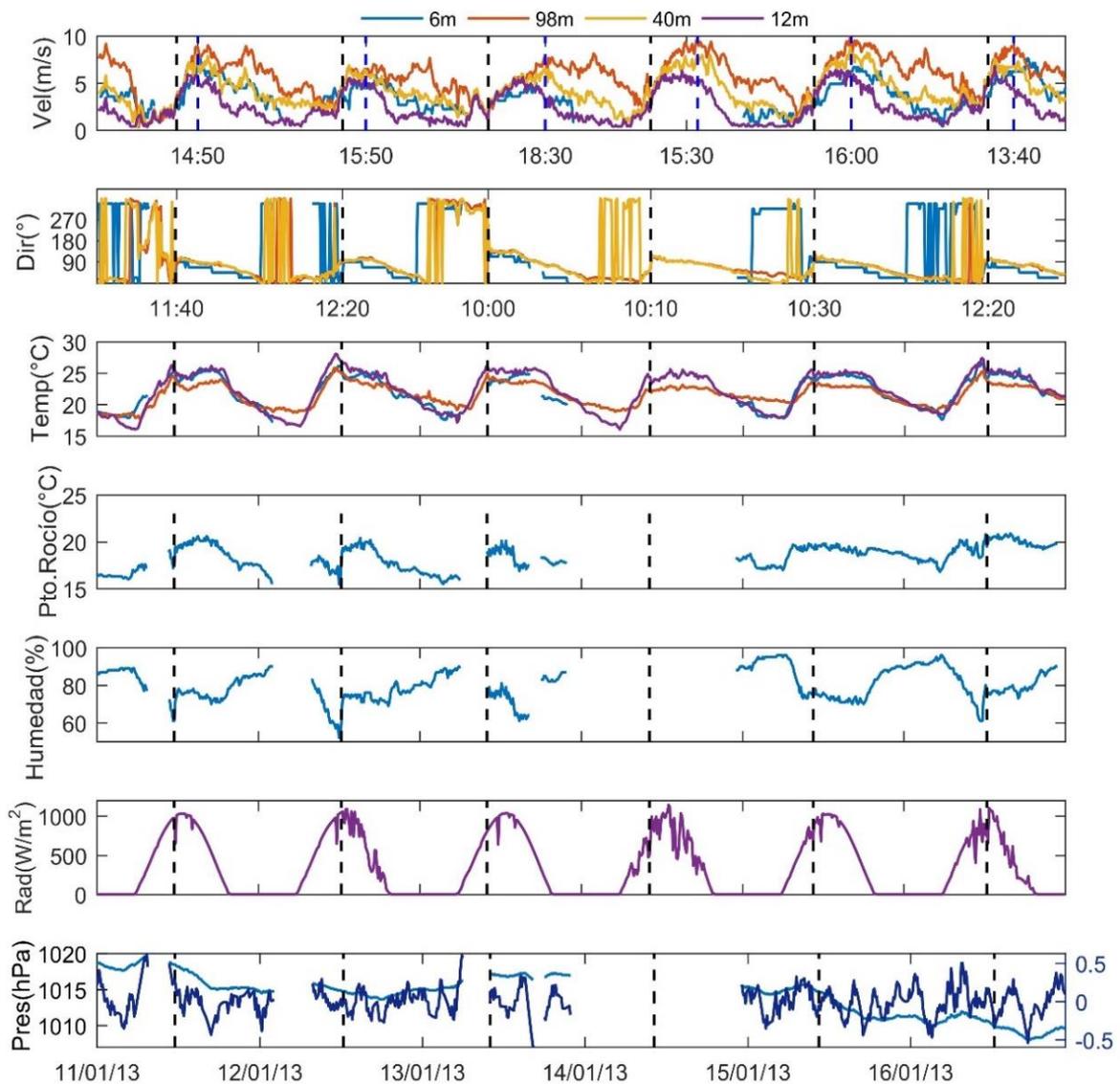


Figura 5.3. Serie temporal de 6 eventos de brisa marina entre del 11 al 16 de enero de 2013 en José Ignacio y Las Garzas. Los colores representan diferentes alturas de medición. Lo medido a 6 metros en color azul pertenece a Las Garzas, y el resto de las alturas a José Ignacio. Se grafica de arriba hacia abajo: el módulo de la velocidad, dirección, temperatura, punto de rocío, humedad, radiación y presión. A su vez en azul oscuro en la última se muestra la presión una vez removida la media móvil de 24 horas. La línea punteada negra marca el inicio de la brisa, mientras que la punteada azul marca la hora del máximo promedio de velocidad alcanzado por la brisa.

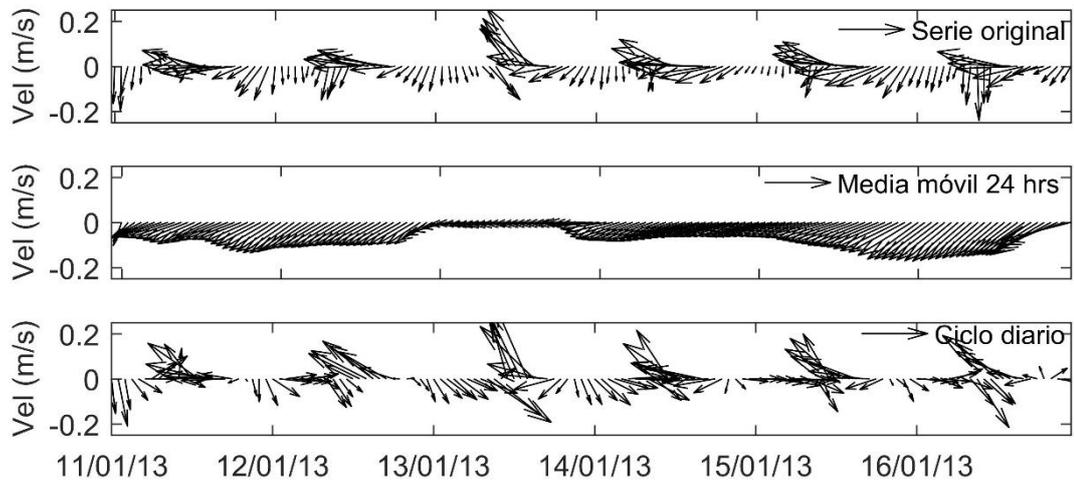


Figura 5.4. Series de datos de viento correspondientes a 12m de altura en José Ignacio. Se observa la serie original, con vientos prevalentes del NE y eventos de brisa marina al mediodía, y debajo la serie descompuesta por la media móvil y el ciclo diario definido como la resta de la serie original menos la media móvil.

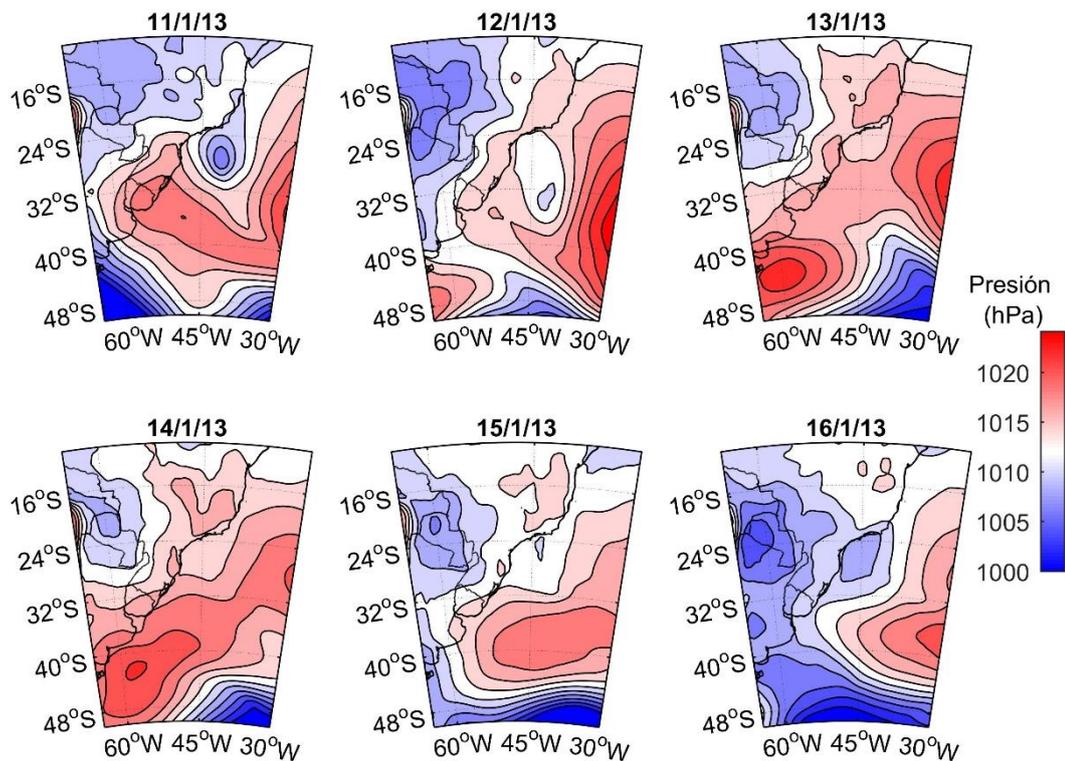


Figura 5.5. Presión superficial del mar para los 6 días con eventos de brisa entre 11 y 16 de enero de 2013. Los contornos están en intervalos de 2 hPa. Se muestra la media diaria. Datos de ERA-INTERIM con resolución horizontal de 0,25°.

En la figura 5.6 se grafica uno de los días anteriores con brisa marina en JIG y GRZ (12 de Enero de 2013). La línea punteada marca el comienzo. Se observa que en JIG la brisa parece comenzar 10 min antes de la línea punteada (12:00) y en GRZ 10 min después (12:20) tomando como referencia el cambio en la dirección del viento y el comienzo del incremento de la velocidad del viento. Esto podría deberse tanto a la variabilidad en el espacio (horizontal y vertical) como un desfase en la hora que miden las estaciones. Para facilitar la visibilidad en el sub-cuadro 2, cuando la

dirección fue mayor a 337° (NO-N) se le asoció 0° (N). Esto sucede en la madrugada, como se puede apreciar en el sub-cuadro 1 en el que se mantuvieron las originales para calcular los vectores. En este período, JIG no tuvo veleta en 12 m, por lo que los vectores u y v se calcularon con la velocidad a 12 m y la dirección a 40 m. La dirección en JIG se mide cada 1° y en GRZ cada $22,5^\circ$ (rumbos).

Cada sub-cuadro de la figura 5.6 permite apreciar comportamientos característicos de las variables asociadas a la brisa. En los vectores de velocidad del viento, se observa un flujo predominante del N-NE y que el viento rota algo más de 90° en la dirección *on-shore* a la vez que se intensifica. El módulo de la velocidad *across-shore* permite identificar lo mismo de manera más clara y a su vez con las 4 diferentes mediciones. Desde las 11:40 en JIG o 12:20 en GRZ hasta las 19:20 el viento tuvo dirección desde el mar, mientras que en los otros horarios desde tierra.

En el 3^{er} sub-cuadro el módulo de la velocidad (rapidez) permite apreciar que existe una cortante vertical durante la noche y madrugada muy intensa, con valores de $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 98m y $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 12m, que disminuye con la salida del sol. Este comportamiento es esperable debido a la dinámica de la capa límite como se describió anteriormente. Cuando ingresa la brisa el módulo del viento aumenta moviéndose toda la columna con la misma rapidez. Esta situación se mantiene durante algunas horas y luego vuelve a generarse la cortante vertical al atardecer. La dirección del viento durante la brisa se mantiene aproximadamente constante en la vertical, aunque tiende a tener

mayores cambios cuanto más cerca de superficie. En la temperatura se observa el máximo previo al ingreso de la brisa, luego una caída y una estabilización. Tanto el punto de rocío como la humedad alcanzan el mínimo diario previo al ingreso de la brisa, con un salto abrupto en el ingreso. Estas 3 últimas características están bien descritas en el estudio de casos en la bibliografía (ej. Miller *et al.*, 2003). En especial, cambios en el punto de rocío suele ser un buen indicador de cambio en las masas de aire, en este caso el ingreso de una menos cálida y más húmeda proveniente desde el mar.

La radiación permite ver la nubosidad en las depresiones de la curva característica. En este día se observa que es una mañana soleada, y cercano al ingreso de la brisa marina se observa nubosidad leve y pasajera, ya que disminuye levemente la radiación por un período corto de tiempo y vuelve para volver al valor correspondiente de cielo despejado, haciendo esto de forma intermitente, cada vez más intenso y duradero, hasta que en la tarde ya se observa una nubosidad persistente (Fig. 5.6). La presión mostró valores intermedios de entre 1014 y 1016 hPa. Cercano al mediodía se observa que: En tiempo menor a 40 minutos entre las 11:40 y las 12:20 hs, la velocidad aumenta $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la dirección rota 90° en sentido horario, la temperatura decae 2°C , el punto de rocío aumenta 4°C y la humedad aumenta 23% (Fig. 5.6). En la figura anterior (5.5) a su vez se puede observar que si bien ocurrió brisa durante los 6 días, no siempre ocurrieron

todos los fenómenos descritos para el 12 de enero, ni en el mismo horario ni con la misma intensidad.

Las imágenes satelitales del día concuerdan con lo medido. Se observa una mañana clara, con desarrollo de nubosidad a la tarde y penetración tierra adentro de dicha nubosidad asociada al frente de brisa hasta cerca de 50 km a las 18:00 hora local (Fig. 5.7).

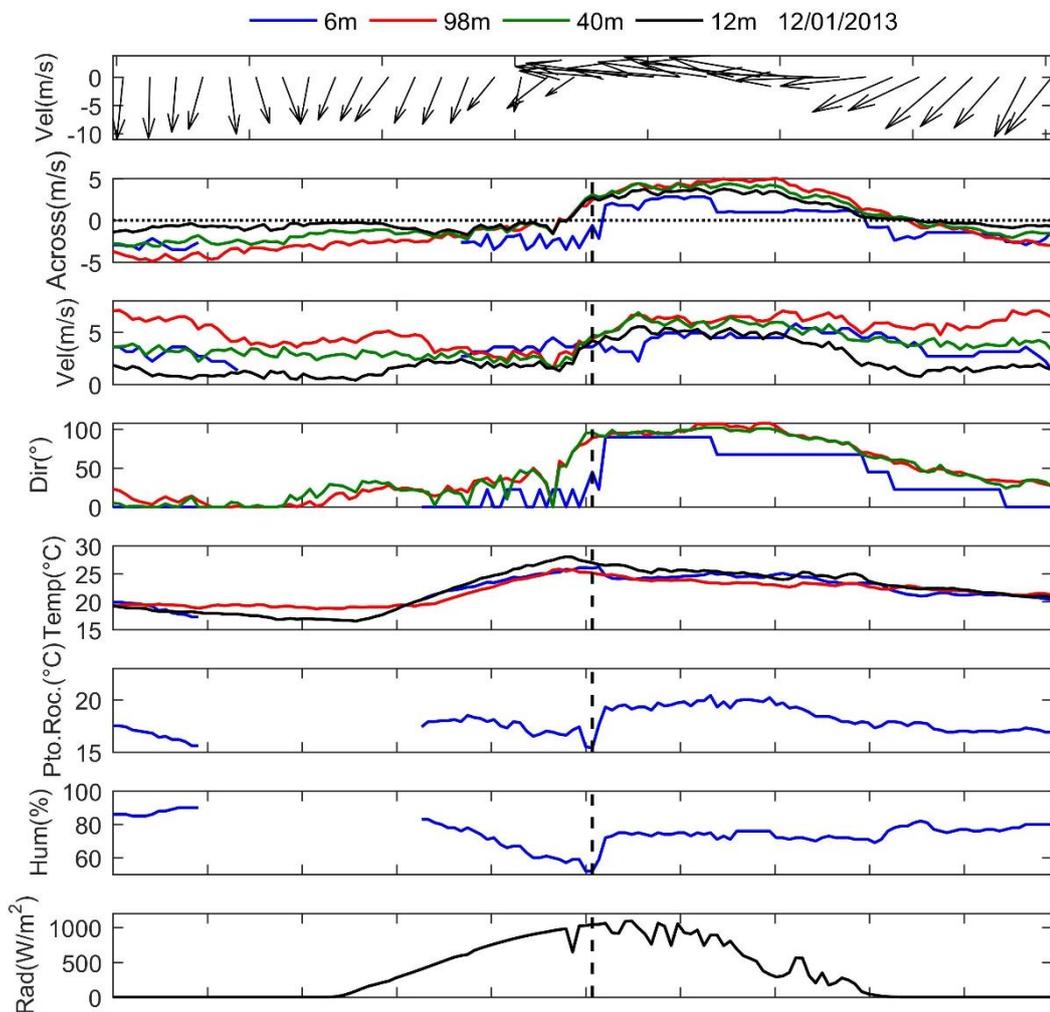


Figura 5.6. 12 de enero de 2013 en las estaciones de José Ignacio (JIG) y Garzas (GRZ) con frecuencia de muestreo cada 10 minutos. Los colores representan la altura de medición. En las Garzas se midieron las variables

a 6 metros (en azul) y todas las demás son de José Ignacio. Ambas estaciones miden temperatura, y viento, y además en JIG se mide radiación y en GRZ se mide humedad. Las 2 estaciones se encuentran a menos de 1km de la costa, la cual tiene la misma orientación a lo largo de los 50 km que las separan.

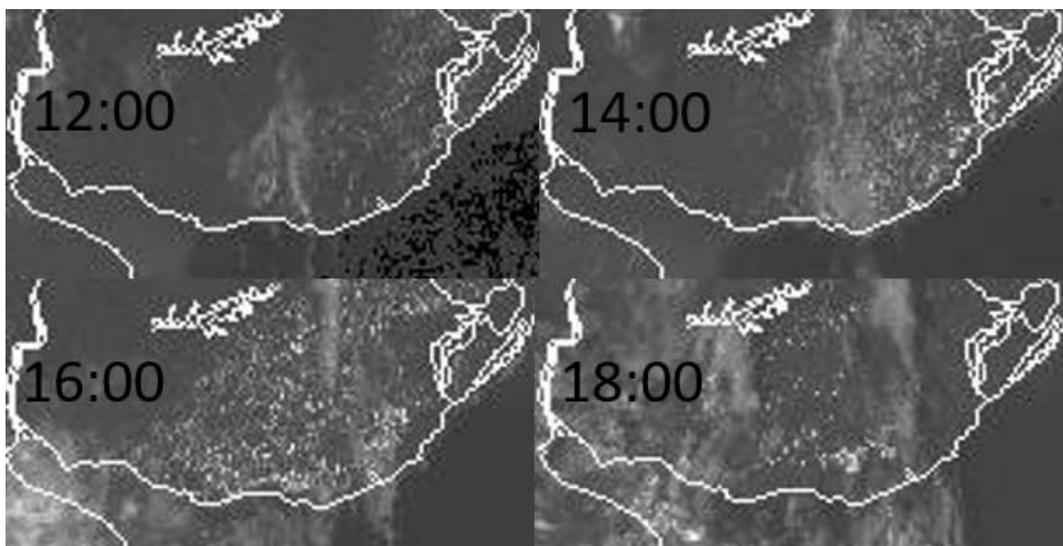


Figura 5.7. Imágenes satelitales del 12 de Enero de 2013. En negro se muestra la hora local (UTC -3). Se observa el desarrollo y penetración de la nubosidad asociada al frente de brisa en las costas de Maldonado y Rocha.

El último caso que se describe en este capítulo es el del 20 de febrero de 2017. Para este día se cuenta con datos de temperatura del mar confiables medidos por el autor en La Paloma. Durante este día se observa un flujo sinóptico moderado desde el norte, temperatura cálida con la mínima en la madrugada cercana a 20°C y en el mar una temperatura media cercana a los 25°C. La temperatura del aire supera a la del mar entre las 09:00 y las

19:00 hs. La brisa comienza 12:30 y finaliza a las 19:00 hs. En ese momento también se oculta el sol y la temperatura del mar supera a la del aire nuevamente. En el ingreso de la brisa la humedad aumenta un 15% y la temperatura cae 1,7 °C justo después de haber alcanzado la máxima diaria de 29,8°C. Casi inmediato al ingreso de la brisa se observa el pasaje de una nubosidad que provoca una caída en la curva de radiación. El máximo del módulo de velocidad de viento durante la brisa marina sucedió a las 16:00 hs y fue de 5,07, 5,02, y 4,58 m.s⁻¹ a 98, 40 y 12 m respectivamente. Nuevamente se observa una cortante vertical de velocidad de viento a la noche con hasta 7,3 m.s⁻¹ de diferencia entre 98 y 12m a las 00:10 hs. A la mañana, con la salida del sol y comienzo de desestabilización de la capa límite, el viento en la vertical comienza a tener similar velocidad y a la hora del ingreso de la brisa no hay prácticamente diferencias en altura. Esto sucede hasta las 16:30 hs, donde comienzan nuevamente a observarse diferencias en altura, y la brisa persiste hasta las 19:00 hs (Fig.5.8).

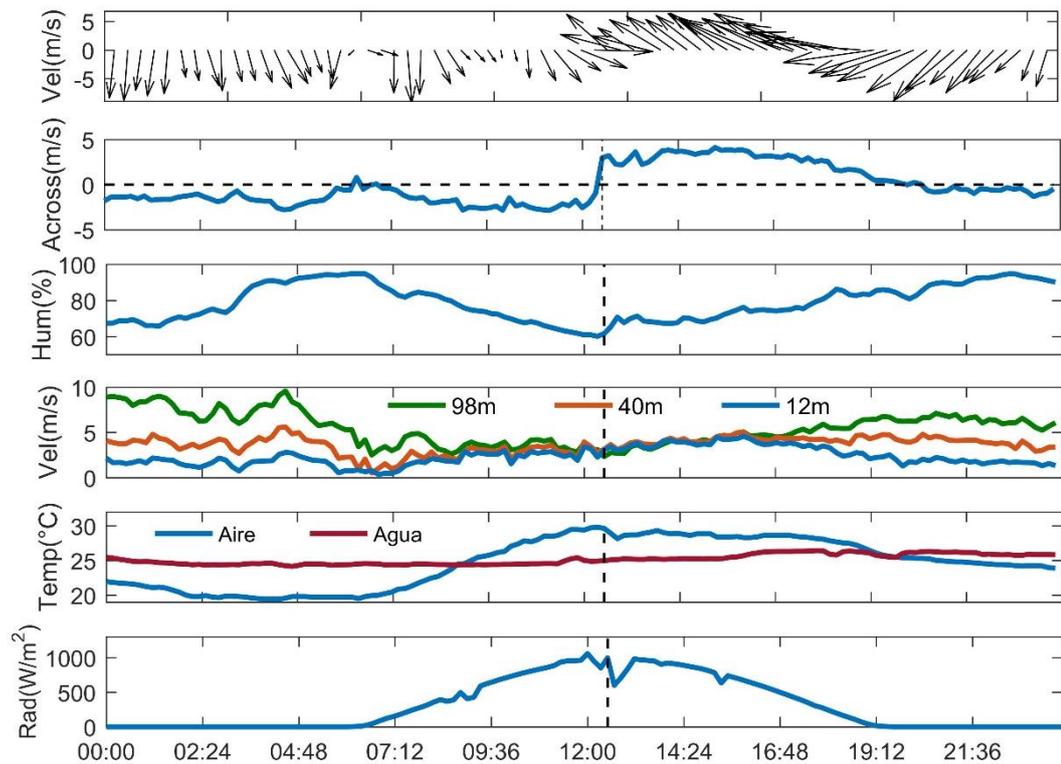


Figura 5.8. Serie temporal con resolución de 10 minutos para el 20 de febrero de 2017 en José Ignacio. El comienzo de un evento de brisa marina está marcado por la línea punteada vertical. De arriba hacia abajo se gráfica: Vectores de velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), la componente *across-shore* de la velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), la humedad relativa (%), el módulo de la velocidad del viento a diferentes alturas ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), la temperatura del aire y del mar ($^{\circ}\text{C}$) y la radiación ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Todas las mediciones pertenecen a José Ignacio excepto las de temperatura de superficie del mar se realizaron en La Paloma.

5.3. Conclusiones

Este capítulo permitió comprender el fenómeno de brisa marina con una resolución temporal fina (10 min) y con más variables que los capítulos anteriores. Se logró identificar los fenómenos asociados a la brisa descritos

en la bibliografía, como la rotación en los vientos utilizando datos a diferentes alturas, la caída de la temperatura y el incremento abrupto de la humedad y punto de rocío con el ingreso de la brisa marina (Azorin-Molina *et al.*, 2011; Miller *et al.*, 2003). Si bien se observaron todos estos fenómenos, es difícil emplearlos en índices para identificar la brisa, ya que no siempre están presentes y no siempre se dan en horarios cercanos, pudiendo haber diferencias de más de 2 horas entre ellos, por ejemplo con el ingreso de la brisa marina.

Asimismo, se estudió la relación entre la diferencia de temperatura entre el aire y el mar debido al calentamiento diferencial provocado por la radiación y el viento *across-shore* derivado (el viento de brisa marina). Este comienza unas pocas horas luego de que la temperatura del aire supere a la del mar. La hora de inicio en base a los pocos casos estudiados y a la biografía estaría determinada por la intensidad del ΔT y la intensidad del flujo sinóptico, con una tendencia hacia el retraso del inicio cuanto mayor la temperatura del mar y menor la máxima del aire (fines del verano) y viento sinóptico moderado e intenso con dirección opuesta a la de la brisa (componente norte).

Para identificar cambios en la presión, especialmente el gradiente espacial asociado a la brisa marina, sería necesario contar al menos un punto de medición en el mar, ya que la serie diaria de presión en un punto muestra oscilaciones derivadas de la marea barométrica y no de la brisa marina. De los 3 días con brisa marina en lo que se contó con registro simultáneo de

presión en Las Garzas y Rocha, ubicadas una en la costa y otra a 27 km hacia el continente formando casi un ángulo recto con la línea de costa, se llegó a registrar diferencias de hasta 2,5 hPa más en la estación de la costa que la de adentrado en el continente a las 15:00 hs.

Se destaca también, la importancia de la precisión de los datos en los estudios a alta resolución. Si bien suena redundante, a esta escala diferencias en la sincronización de los relojes de las estaciones meteorológicas son importantes, ya que pueden llevar a malinterpretaciones en la variabilidad espacio-temporal (ej. la hora de ingreso de la brisa marina en diferentes localidades costeras), entre otras cosas.

Un análisis primario mostró que GFS y ERA-INTERIM subestiman la cantidad de brisas en relación a los datos *in situ*. Mientras que en JIG se encontraron 20,7% de días con brisa, en GFS 12,7% y en ERA-INTERIM 2,8%. Este resultado debe ser estudiado con mayor detalle interiorizándose en los modelos.

Se constató que en un día posiblemente característico de brisa marina en nuestro país, en un tiempo menor a 40 minutos entre las 11:40 y las 12:20hs, la velocidad aumentó $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la dirección rotó 90° en sentido horario, la temperatura decayó 2°C , el punto de rocío aumentó 4°C , la humedad aumentó 23% y la presión decayó 0,26 hPa.

Las relaciones en dependencia entre las variables deberían de complementarse con un modelo numérico y así poder controlar cada factor.

6. DISCUSIÓN GENERAL

La discusión general se divide en dos partes. En primer lugar se discute sobre las fuentes de datos y la metodología empleada para identificar los eventos de brisa marina, y en segundo lugar los resultados obtenidos del estudio de clima de brisas una vez identificados los eventos.

6.1. Los datos y el método de identificación de brisas

Existen dos fuentes de variabilidad que aportan ruido a la hora de describir e identificar los eventos de brisa en el Uruguay que esta tesis intentó controlar. Estos son la variabilidad asociada a la toma del dato y la variabilidad asociada al método de identificación de brisas. Para minimizar su efecto se buscó seleccionar estaciones representativas de la región y crear un índice de identificación de brisas que filtre los días de brisa de los de no brisa contemplando las diferencias en la altura de medición de las estaciones (6 a 40m) y diferencias en los vientos medios a lo largo de la costa. Diferentes umbrales para el índice, y/o diferentes estaciones seleccionadas hubieran llevado a resultados hasta un orden de magnitud mayor que toda la variabilidad encontrada de cantidad de brisas entre estaciones y en el tiempo, por lo que en esta parte se intentó ser particularmente estricto.

Recolectar y generar una base de datos comparable fue uno de los procesos más laboriosos de esta tesis. Para ello fue necesario realizar

tratamientos a las diversas series de datos como homogenización del paso temporal (promedio horario) y del identificador de ausencia de dato, cambiar unidades de medida, identificar en varios casos saltos en la serie temporal y *outliers*, distinguir entre horario UTC, UTC-3 u horario local de verano, etc. Conocer el contexto geográfico y el modelo de los aparatos de medición fue también importante, ya que hubo casos que llevaron a descartar la serie de datos desde el comienzo debido por ejemplo, a interferencias físicas en la medición del viento. En algunos casos se detectó la ausencia de este tipo de metadatos.

El periodo 2011-2016 quedó determinado por el compromiso en maximizar la cobertura espacial con la temporal, ya que eran pocas las estaciones que contaban con una cobertura temporal mayor a 5 años. La base seleccionada quedó definida a grandes rasgos por la capacidad de las estaciones de haber mantenido un registro continuo y la distribución espacial homogénea a lo largo de la costa. Estos datos fueron generados siempre por los servicios, como INUMET, INMET y UTE. Algunos esfuerzos de grupos individuales, como Limnología/CURE en Las Garzas, generaron un dato de calidad sostenido en el tiempo, pero el hecho de tener varios períodos con ausencia de datos y la diferencia en el instrumental, en particular la toma de datos en el que la dirección se mide en rumbos, hicieron que esta estación fuera descartada de la base seleccionada. Otras estaciones, como Cabo Polonio, mostraron a su vez baja representatividad espacial (poco correlacionada con las estaciones cercanas), por lo que la

utilidad de los datos se reduce a estudios específicos del área, objetivo con el que fue instalada. La estación de la Boya Petrolera a 4 kilómetros mar adentro mostró un clima de vientos muy diferente a los demás, en el que el efecto de la brisa marina es más bien una intensificación de los vientos sin observarse una marcada rotación, ya que estos tienden a venir desde el mar también durante la mañana, a diferencia que en tierra (donde vienen desde tierra), demostrando la importancia del eje *across-shore* en la variabilidad del clima de vientos. Las estaciones en los cabos atlánticos como Cabo Polonio y Punta del Este, mostraron una tendencia a tener este clima de vientos más marítimo.

Se identificaron una serie de eventos, denominados brisas puras, cercanas al 16% de los días en el que en la mayoría de los casos no hubo dudas sobre la ocurrencia de brisa marina. Por otro lado, el índice de brisas ocultas fue demasiado ambicioso para ser utilizado en toda la costa y en diferentes alturas. El objetivo, parcialmente cumplido, fue estimar la cantidad de eventos de brisa marina que ocurren "ocultas" en el flujo sinóptico. Hasta donde incluir o no estos eventos es una de las causas que llevan a encontrar valores climatológicos tan distintos en los diferentes trabajos (Miller *et al.*, 2003). Por ejemplo Azorin-Molina y colaboradores en 2011 encuentran en la Bahía de Alicante en España, 475 y 1414 eventos de brisa marina utilizando un índice de selección automático y manual respectivamente para la misma serie de datos analizados.

No existe aún una metodología única para identificar los eventos, y en la gran mayoría de los antecedentes los umbrales de identificación se eligen en base a los datos, como se discute en la siguiente sección. Sin embargo, el haber evaluado la calidad de los datos y la representatividad espacial de las estaciones para generar una base seleccionada contribuyó de manera sustancial a eliminar el ruido asociado a la estación, ya sea en la forma que se toma el dato o en las particularidades del contexto geográfico donde mide, ya que en esta tesis se buscó describir características generales del clima de brisas en la costa uruguaya.

6.2. Sobre el clima de brisas

Las dificultades encontradas por el estado actual del conocimiento para definir que es un día con brisa marina hace muy difícil el comparar los resultados con otros antecedentes. Más aún cuando los trabajos tienden a utilizar índices diferentes para la identificación, ya que las condiciones locales a su vez tienden a exigir adaptar el índice para cada región (Simpson, 1994). Por más que la mayoría utilice filtros similares como la rotación del viento, cambios en la temperatura, y/o las condiciones sinópticas, llegan a resultados muy distintos.

Azorín-Molina y colaboradores en 2011 encontraron en la Bahía de Alicante 475 eventos de brisa marina con un índice automático y 1414 con uno manual para los mismos 6 años de estudio, como se mencionó anteriormente. El trabajo a su vez realizó una revisión y aplicación de varios

índices utilizados por otros autores previamente. Entre diciembre de 2007 y julio de 2010, Cisneros y Piccolo (2011) encontraron 40 casos en Monte Hermoso, Argentina. Steele y colaboradores en 2015 encontraron entre 154 y 335 eventos según la región de la costa Este de Inglaterra, descubriendo grandes diferencias entre localidades muy cercanas, analizando el período enero 2002 a diciembre 2012 utilizando el modelo WRF. Pazandeh y colaboradores (2016) encontraron un promedio anual de 27% de días con brisa marina, 42% en verano y 10% en invierno, analizando datos *in situ* en el período entre 1955 y 2008 en Adelaide, Australia. En comparación, en esta tesis se encontró un promedio de 355 días en 6 años, siendo similares a los encontrados para la costa sur de Australia y la Mediterránea de España con el método de detección automática.

Los resultados arrojan que existe un ciclo diario de viento muy probablemente vinculado con el calentamiento diferencial de la tierra y el agua. Esto genera una diferencia de presión que provoca una rotación *on-shore* e intensificación de los vientos hacia la tarde en un gran número de días al año. La brisa suele ser de menor magnitud que el flujo sinóptico, a excepción de algunos días con flujo sinóptico suave debido a un gradiente de presión débil, presión atmosférica intermedia y una temperatura máxima del aire que supera a la del mar, haciendo que los efectos de la brisa marina en la costa se hagan notorios y prevalentes. Estos días se concentran en el periodo de diciembre a marzo, debido no sólo a que se tiende a alcanzar mayores diferencias entre la temperatura del aire y del mar, sino también

porque el contexto climático es más favorable. La presión media es menor y el gradiente de presión más débil. La ciclogénesis es menos frecuente (Gil, 2016), el anticiclón semipermanente del atlántico sur se ubica más al sur y penetra menos en el continente, donde se genera una baja (presión) térmica (Peterson y Stramma, 1991), siendo más frecuentes los vientos del NE en Uruguay. A su vez, durante este período del año son menos habituales los eventos de presión mayor a 1025 hPa, donde no se desarrolla la brisa marina. La presión media y el gradiente de presión, en conjunto con una alta diferencia entre la temperatura máxima del aire y la media del mar, parecen ser los mejores predictores de brisa marina en Uruguay.

El gradiente espacial de presión en algunos antecedentes ha sido utilizado en el índice para identificar eventos de brisa marina (ej. Steele *et al.*, 2015). Azorin-Molina y Lopez-Bustins en 2008 utilizaron el índice de presión entre España e Italia WeMOI (Western Mediterranean Oscillation Index), utilizado originalmente para estudiar precipitaciones, como un buen indicador para el desarrollo de la brisa marina. Encontraron que para el intervalo entre -1 y 1 hPa del índice (gradiente débil), quedaban excluidos un 56% de días sin brisa y un 18,7% de los días con brisa. En esta tesis se observó un patrón similar, a pesar de ubicarse en regiones climáticas diferentes y haber utilizado una distancia menor para el índice de gradiente de presión. El análisis de varianza en esta tesis identificó diferencias significativas en la media del valor absoluto del gradiente de presión entre los días de con y

sin brisa generalizada durante el verano, con una media menor los días con brisa e intervalos de confianza entre 0 y 2 hPa.

Otra apreciación que se logró demostrar en esta tesis es que en todos los meses del año, y la mayoría de los días, la temperatura del aire supera a la del mar en algún momento del día (y viceversa en la noche con la brisa de tierra), aunque probablemente en varios casos no se alcance el gradiente necesario como para vencer la fricción con la superficie. Sin embargo, el factor determinante para el desarrollo de la brisa parecería ser la presión atmosférica y el gradiente espacial de presión, como indicador de las condiciones sinópticas. Es así que la brisa, fenómeno de mesoescala, queda completamente dependiente de las condiciones de macroescala o sinópticas (Arrit, 1993).

Se encontraron diferencias en el clima de brisa marina a lo largo de la costa, a pesar de ser el eje de menor variabilidad con respecto al vertical y al perpendicular a la costa. Los límites de significancia se ubicaron entre Carrasco y José Ignacio principalmente, de modo que los extremos de la costa (Colonia-Artilleros y Esmeralda-Chuy) no estuvieron estadísticamente correlacionados entre sí en cuanto a los eventos de brisa.

Todos los análisis concentrados en días de brisa tendieron a agrupar el 2^{do} tramo del estuario con el 1^{ero} del océano (Carrasco a José Ignacio). A su vez, la performance del índice siempre fue mayor en este tramo, el cual es el tramo por excelencia más representativo de la costa uruguaya pues es

donde se concentra la mayor densidad poblacional (tomando Carrasco como representante de Montevideo). Se podría haber excluido los otros tramos, pero justamente uno de los objetivos era encontrar diferencias espaciales a lo largo de la costa. Lo interesante a su vez de los tramos que comprenden de Carrasco a José Ignacio, es que, si bien climatológicamente uno pertenece al estuario y el otro al océano y los cluster de temperatura del aire y mar los separaron claramente, es una zona muy dinámica desde el punto de vista oceanográfico, la cual puede presentar mayor similitudes al océano o al estuario a lo largo del tiempo (Nagy *et al.*, 2002). Por otra parte, la distancia entre las estaciones sin duda fue determinante en la similitud de clima de brisas. Mientras que la distancia máxima entre los dos tramos desde Carrasco a José Ignacio es de 120 km (lineal), de Carrasco a Colonia hay 163 km y de José Ignacio a Chuy hay 174 km. Esto también se puede interpretar como un sesgo en el intento de obtener estaciones homogéneamente espaciadas. De hecho lo es, por eso se excluyó a Laguna del Sauce que contaba con una cobertura temporal cercana al 100%. Aun así no fue suficiente. No es coincidencia la correlación entre densidad poblacional y densidad de estaciones meteorológicas. Estos resultados dan indicios sobre la forma de dividir en tramos la costa uruguaya para continuar caracterizando con mayor detalle la brisa marina así como donde colocar nuevos esfuerzos de muestreo. El tramo desde La Paloma hasta La Esmeralda es probablemente el que cuenta con menos datos.

En cuanto a la variabilidad interanual, los años con pocas brisas se caracterizaron por tener pocos eventos en los meses centrales del verano (enero y febrero), mientras que los años con muchas brisas se caracterizaron por tener un particular aumento en los meses inmediatamente anterior y posterior al verano como noviembre y marzo, y en menor medida abril. Esto sugiere que para estos años las condiciones climáticas asociadas al verano en la región hayan sido más duraderas. Igualmente los pocos años estudiados no permiten generalizar las conclusiones. Estudios posteriores que apunten a explicar y predecir la variabilidad interanual o intraestacional (dentro del verano) de la cantidad de eventos de brisa en Uruguay deberán realizar una asociación con los fenómenos climáticos que tienden a generar las condiciones sinópticas favorables para el desarrollo de la brisa marina en Uruguay (pasaje de los sistemas de alta presión y/o bloqueos atmosféricos), siendo posibles candidatos El Niño-Oscilación Sur o la Oscilación de Madden-Julian.

En cuanto a la identificación de la nubosidad asociada al frente de brisa, se logró observar por satélite en algo más de la mitad de los casos de brisa generalizada (55%). Esta permitió a su vez estudiar el desarrollo y la penetración tierra adentro, y se observó que en general comienza primero en Rocha y luego en todo el resto de la costa, penetrando hasta cerca de 55 km. En general, si la humedad no es suficientemente alta, no se forman las nubes, y la existencia de un flujo sinóptico opuesto a la dirección de la brisa marina genera un frente más definido (Estoque, 1962). En

comparación, Planchon y colaboradores (2006) encontraron hasta un 25% de los días con el frente de brisa definido durante la temporada seca del 2000 en el nordeste brasilero. En el presente estudio se encontró el frente de brisa en 36% de los casos en 120 días analizados en verano, aunque sesgado positivamente ya que el 50% de los días utilizados habían sido previamente identificados como días con brisa. A su vez, la isolínea de 16% de reflectancia planetaria fue un buen indicador del inicio de los cúmulos asociados al frente de brisa para aquellos días sin una cobertura nubosa asociada a los grandes sistemas sinópticos.

La estación de José Ignacio fue la mejor fuente de datos meteorológicos de la costa uruguaya que se consideró en esta tesis. Esto es por la cantidad de variables que se miden, la calidad del dato que se obtiene, la resolución temporal con que se toman, y la representatividad de la zona de gran parte de la costa uruguaya. Boya Petrolera podría haber sido un excelente complemento de datos meteorológicos y oceanográficos 4 km mar adentro de José Ignacio, pero es necesario someterlos a un control de calidad más intensivo. Este trabajo reafirma la importancia del control de calidad y la necesidad de hacer los datos comparables cuando se trabaja especialmente con viento, ya que es una variable con baja autocorrelación en las cuatro dimensiones de espacio-tiempo en relación a otras como la temperatura o presión. Si bien la señal puede ser muy clara, como en este caso la del fenómeno de brisa marina, suele estar en un contexto ruidoso.

Por otra parte, no se pudo demostrar que la costa de Rocha sea más ventosa ni que tenga más eventos de brisa. La orientación de la costa en relación a los vientos prevalentes facilita el viento se tome dirección *on-shore*, el cual suele ser el menos preferido por los usuarios de la playa en verano ya que baja la sensación térmica. Tampoco se observó que tenga una mayor velocidad media del viento comparado con el resto de la costa uruguaya.

En esta tesis no se estudió la brisa de tierra. Describirla probablemente presente dificultades aún mayores que la brisa marina, debido a que la dirección de los vientos prevalentes del NE, coincide con la dirección de la brisa de tierra que con la brisa marina, particularmente en el estuario, y a su vez la cortante vertical de velocidad de viento durante el horario de la brisa de tierra (noche y madrugada) es mayor que en el de la brisa marina, por lo que sería aún más importante discriminar el análisis según la altura de medición.

Con respecto a lo que puede ser tendencias climáticas para la brisa, es muy difícil pensar un escenario a futuro, ya que es un fenómeno de mesoescala completamente dependiente de los procesos de macroescala. Sin embargo, esta tesis aporta a generar escenarios posibles, como la tendencia a migrar hacia el sur en la posición del anticiclón (Lu *et al.*, 2007), y si esto aumentaría o no las condiciones para que se dé más frecuente el fenómeno de brisa marina. Otra pregunta a estudiar es cómo evolucionará

la temperatura de superficie del mar del Rio de la Plata, el cual tiende a calentarse más rápidamente que el océano adyacente, lo que resultaría en un retraso en el inicio e intensidad de la brisa hacia el oeste en verano. De calentarse más la tierra que el océano también sería esperable una intensificación principalmente del módulo del viento en el océano, etc.

El creciente desarrollo de la población y urbanización en la costa atlántica uruguaya da lugar a un presente y futuro de generación eólica, así como la creciente demanda de energía en verano y en horario laboral debido principalmente a los aires acondicionados (AC). La generación local e instantánea de energía eólica por aerogeneradores de pequeño y gran porte hacen que la brisa marina vaya a tener grandes perspectivas en un futuro a corto plazo. A su vez ofrece un servicio ecosistémico doble en cuanto al agobio del calor. Por un lado, el viento y el aire más fresco y por otro contribuye a generar energía para los AC.

El fenómeno de brisa marina no solo genera perspectivas de interés económico en el presente y futuro debido a la posibilidad de desarrollar energías limpias como la eólica y la solar, sino que también tiene un alto valor folclórico y fue probablemente participe del direccionamiento del desarrollo histórico de los balnearios en los cabos atlánticos, los cuales cuentan con playas con orientación al SO donde en general es posible ver el atardecer al abrigo de la brisa marina durante el verano. Estas playas a su vez tienden a ser reflectivas, con una gran pendiente con forma de

“pozo” el cual genera efectos locales en el viento, tendiendo a ser más débil en superficie.

Por último, de continuar la urbanización costera, la brisa tomará relevancia también en el estudio de la calidad de aire debido al rol que cumple en la concentración y dispersión de contaminantes, así como por su interacción con el efecto de isla de calor urbana, como ya ocurre en otros países (Miller *et al.*, 2003).

7. CONCLUSIONES GENERALES

Se logró crear una base de datos horarios consistente de 16 estaciones meteorológicas entre 2011 y 2016.

Se regionalizó la costa uruguaya de acuerdo a características climatológicas de temperatura del aire y mar así como del ciclo diario de viento, logrando definir 2 grandes regiones divididas por el estuario y el océano y a su vez cada una en 2 subregiones con identidad definida.

Los vientos predominan del NE en todo el país durante casi todo el año, a excepción de otoño-invierno en el que la frecuencia de vientos del SO es similar a la del NE y en algunas estaciones mayor. La estación con mayor velocidad media es primavera, siguiendo invierno, verano y otoño en orden decreciente respectivamente.

Las condiciones de diferencia entre temperatura del aire y mar (o sea, que la temperatura del aire supere a la del mar), se dan durante todo el año, siendo abril y mayo los meses en que se da con menor frecuencia.

Existe un ciclo diario de vientos en la costa uruguaya caracterizado por una componente perpendicular a la costa desde tierra en la mañana la cual rota y aumenta su intensidad pasando a ser desde el mar hacia la tarde, y una componente paralela a la costa durante todo el día la cual tiende a ser con componente sur en otoño-invierno y norte en primavera-verano.

Ocurren 60 días de brisa pura al año donde la brisa marina domina el flujo, y otros 60 donde está oculta en el flujo sinóptico. De los 60 dominantes, 30 ocurren en verano (dic-mar) y 30 en el resto del año. De los 60 ocultos, 40 ocurren en verano y los otros 20 en el resto del año.

De los 60 días promedio de brisa al año, 52 ocurren en al menos la mitad de las estaciones, por lo que cuando se da un evento de brisa, éste tiende a ocurrir en la mayor parte de la costa uruguaya. Este comportamiento se verifica particularmente entre Carrasco y José Ignacio.

La variabilidad interanual analizada en esta tesis (6 años) arrojó que la frecuencia de brisas suele mantenerse cercana al promedio, excepto por años puntuales en los que puede aumentar considerablemente. Dichos años se caracterizan por gran cantidad de eventos en los meses de marzo y/o noviembre. El escaso número de años considerados para este tipo de análisis no permite realizar conclusiones robustas.

Los días de brisa marina se caracterizan por ser de cielo claro (alta radiación), presión intermedia y alta tomando como referencia el promedio de verano (1006-1023 hPa) y velocidad de viento entre 0 y 7 m.s⁻¹ capaz de alcanzar hasta 9 m.s⁻¹. A presiones mayores a 1025 hPa, no se desarrolla la brisa.

Existe una correlación significativa entre los días de brisa marina y anomalías positivas de presión en superficie del mar en Uruguay y el océano argentino, asociado con el ingreso de un sistema de alta presión al

sur de Uruguay cuyo centro tiende a trasladarse de oeste a este, generando vientos sinóptico del NE en Uruguay y un gradiente de presión *across-shore* débil y decreciente tierra adentro. Este fenómeno tiende a durar cerca de 4 días, generando brisas dominantes y brisas ocultas en la costa de Uruguay.

El evento de mayor cantidad de días de brisa marina seguida se observó en marzo 2015 con una duración de 12 días de forma generalizada y hasta 13 en una estación en particular. Este evento estuvo asociado a un bloqueo atmosférico en el Atlántico Sudoccidental.

La temperatura del aire supera a la del mar entre las 09:00 y las 19:00 hs y la brisa comienza entre las 11:00 y las 12:00 hs. La hora de finalización es difícil de determinar, próximo al atardecer. Los valores típicos que alcanzan las variables son: Velocidad máxima promedio de $7,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y ΔT de 5°C .

La mayor diferencia entre la brisa marina en el estuario y el océano es que en el océano comienza antes en el día, es más persistente y tiene dirección SE mientras que en el estuario comienza después y tiene dirección S. Esto se debe a la orientación de la costa en relación a los vientos prevalentes del NE y el grado de acoplamiento océano-atmosfera que es mayor en el estuario.

En algo más de la mitad de los días con brisa generalizada, se observa una nubosidad asociada al frente de brisa, que penetra tierra adentro con un máximo cerca de 55 km al atardecer.

El factor determinante para el desarrollo de la brisa marina es la presión atmosférica, la cual debe de ser preferentemente intermedia. Esto contempla tanto el viento intenso que no permite el desarrollo, principalmente asociado a los sistemas de baja presión, como las situaciones de muy alta presión en las que el viento no es muy intenso pero aun así la celda de brisa no logra generarse presumiblemente debido a la alta estabilidad vertical.

El estudio de la brisa en una estación y con alta resolución permitió identificar varias características descritas en la bibliografía durante el ingreso de la brisa marina como la caída de la temperatura, el aumento de la humedad y el punto de rocío, entre otros, pero es difícil emplearlos en índices para identificar la brisa, ya que no siempre se desarrollan y no siempre se dan en horarios cercanos, pudiendo haber diferencias de más de dos horas entre ellos, por ejemplo en la hora de comienzo de la brisa.

GFS y ERA-INTERIM subestiman la cantidad de brisas en relación a los datos *in situ*. Mientras que en la estación de José Ignacio se encontraron 20,7% de días con brisa, en GFS 12,7% y en ERA-INTERIM 2,8%. El GFS, aunque subestimando la cantidad de eventos, reprodujo el evento en el 61% de los casos con valores de intensidad de viento similares a los observados.

Un día característico de brisa marina en nuestro país comienza con viento suave del NE en la mañana y en un tiempo menor a 40 minutos entre las 11:40 y las 12:20 hs, la velocidad aumenta 3 m.s^{-1} , la dirección rota 90° en sentido horario, la temperatura disminuye 2°C , el punto de rocío aumenta 4°C y la humedad 23%. La velocidad máxima del viento se alcanza entre las 16:00 y las 17:00 hs hasta un valor medio de $7,1 \text{ m.s}^{-1}$.

No hay más días con brisa marina en la costa de Rocha que en la de Montevideo o Canelones. La orientación de la costa con respecto a los vientos predominantes (NE) son los que dan la sensación (o realidad) de que la costa de Rocha es más ventosa que la del estuario, ya que una pequeña rotación del viento en sentido horario provocado por la brisa ya es suficiente para poner el viento *on-shore*, el cual suele ser el que "molesta" al veraneante en la playa, ya que entre otras cosas, baja la sensación térmica. Por esta razón, el abrigo de la brisa puede haber sido relevante para el desarrollo de los balnearios en los cabos atlánticos con playas que miran al SO.

Se espera que la caracterización del clima de brisa marina en Uruguay realizado en este trabajo sirva de plataforma para estudios posteriores de modelización y predicción. Su gran importancia para la generación de energía eólica y solar (asociada a cielo claro), y su rol en la dispersión o concentración de contaminantes y calidad del aire, ameritan un estudio continuo y detallado de la brisa en nuestro país.

8. BIBLIOGRAFIA

- Abbs, D. y Physick, L. (1992). Sea-breeze observations and modelling: a review. *Australian Meteorological Magazine*, 41, 7-19.
- Alonso, R. (2012). *Evaluación del potencial undimotriz de Uruguay*. Tesis de Maestría en Mecánica de Fluidos, Universidad de la República.
- Alpert, P., y Rabinovich-Hadar, M. (2003). Pre-and Post-Sea-Breeze Frontal Lines-A Meso-γ-Scale Analysis over South Israel. *Journal of the atmospheric sciences*, 60(24), 2994-3008.
- Arritt, R. (1993). Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze. *Journal of Applied Meteorology*, 32(1), 116-125.
- Azorin-Molina, C. y Lopez-Bustins, J. (2008). An automated sea breeze selection technique based on regional sea-level pressure difference: WeMOi. *International Journal of Climatology*, 28(12), 1681-1692.
- Azorin-Molina, C., Tijm, S. y Chen, D. (2011). Development of selection algorithms and databases for sea breeze studies. *Theoretical and applied climatology*, 106(3-4), 531-546.
- Balay, M. (1961). *El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar*. Secretaría de Marina. Servicio de Hidrografía Naval Argentina.
- Biggs, W. y Graves, M. (1962). A lake breeze index. *Journal of Applied meteorology*, 1(4), 474-480.
- Cisneros, M. y Piccolo, M. (2011). Caracterización de la brisa de mar en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. *Estudios Geográficos*, 72(271), 461-475.
- Crosman, E. y Horel, J. (2010). Sea and lake breezes: a review of numerical studies. *Boundary-layer meteorology*, 137(1), 1-29.

- Dai, A. y Wang, J. (1999). Diurnal and semidiurnal tides in global surface pressure fields. *Journal of the atmospheric sciences*, 56(22), 3874-3891.
- De Mello, S., Cazes, G., y Arce, A. (2015). *Operational wind energy forecast with power assimilation*. En: 14th International Conference on Wind Engineering. Porto Alegre, Brasil.
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... y Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.
- Emery, W. J. and R. E. Thomson (2001). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier.
- Fourment, M., Bonnardot, V., Planchon, O., Ferrer, M. y Quénol, H. (2014) Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier: observations dans le sud de l'Uruguay. *Climatologie* 11:47–64
- Estoque, M. (1962). The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19(3), 244-250.
- Gil, N. (2016). *Caracterización de la actividad ciclónica en el sureste de América del Sur y Océano Atlántico Sur durante la temporada de invierno*. Trabajo final de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera, Universidad de la República.
- Gómez Pivel, M. (2006). *Geomorfología y procesos erosivos en la costa atlántica uruguaya*. En: .Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya (No. 504.4 (899) BAS).

- Guerrero, R., Acha, E., Framin, M., y Lasta, C. (1997). Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. *Continental Shelf Research*, 17(7), 727-742.
- Gutiérrez, A. (2011). *Herramientas de Predicción de muy corta y corta duración de la Energía Eólica*. Tesis de Maestría en Mecánica de Fluidos, Universidad de la República.
- Gutierrez, A. (2015). *Description of Intensity of Turbulence IT in dependence with stability regime at swept area of wind turbines blades heights*. En: 14th International Conference on Wind Engineering. Porto Alegre, Brasil.
- Hartmann, D. L. (2015). *Global physical climatology* (Vol. 103). Newness.
- Holton, J. R., y Hakim, G. J. (2012). *An introduction to dynamic meteorology* (Vol. 88). Academic press.
- Kundu, P. y Cohen, L. (1990). *Fluid Mechanics*. Academic press, Calif.
- Lu, J., Vecchi, G. y Reichler, T. (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters*, 34(6).
- MIEM. (2006). *Evaluación de Energía Eólica: Análisis de Situación y Aspectos Asociados a la Introducción de Mayor Potencia- 200 MW*. Informe del Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay.
- Miller, S., Keim, B., Talbot, R. y Mao, H. (2003). Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Reviews of geophysics*, 41(3).
- Nagy, G., Pshennikov, V. y Robatto, P. (2002). *Monthly variability of salinity in the frontal zone of the Río de la Plata off Montevideo, in response to consecutive ENSO fluctuations and the flow of the Uruguay river (1998-2000)*. En: El Río de la Plata: Investigación para la Gestión del Ambiente, Recursos Pesqueros y la Pesquería en el Frente Salino. Programa Ecoplata.

- Niino, H. (1987). The linear theory of land and sea breeze circulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 65(6), 901-921.
- Panario, D., y Gutiérrez, M. O. (2006). *Dinámica y fuentes de sedimentos de las playas uruguayas*. En .Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya (No. 504.4 (899) BAS).
- Pazandeh M., Walker, D. y Crowther, J. (2016). Sea breeze characteristics on two sides of a shallow gulf: study of the Gulf St Vincent in South Australia. *Meteorological Applications*, 23(2), 222-229.
- Peterson, R. y Stramma, L. (1991). Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 26(1), 1-73.
- Pienika, R. y Cataldo, J. (2012). *Análisis estadístico de datos climáticos aplicado a la clasificación de zonas vitícolas en Uruguay*. En: 2^{do} Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento. La Plata, Argentina.
- Planchon, O., Damato, F., Dubreuil, V., y Gouéry, P. (2006). A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing. *Meteorological Applications*, 13(3), 225-234.
- Possia, N., Cerne, B., y Campetella, C. (2014). Descripción de las variaciones horarias medias de presión en la Argentina y su influencia en los sistemas béricos. *Meteorologica*, 39(1), 59-71.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... y Liu, H. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1057.
- Salvador, N., Loriato, A., Santiago, A., Albuquerque, T., Reis Jr, N., Santos, J., ... y Moreira, D. (2016). Study of the Thermal Internal Boundary Layer in Sea Breeze Conditions Using Different Parameterizations:

Application of the WRF Model in the Greater Vitória Region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(4), 593-609.

Simpson, J., (1994). *Sea Breeze and Local Winds*. Cambridge University Press.

Simpson, J., y Britter, R. (1980). A laboratory model of an atmospheric mesofront. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(449), 485-500.

Smith, W., y Sandwell, D. (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334), 1956-1962.

Steele, C., Dorling, S., von Glasow, R. y Bacon, J. (2015). Modelling sea-breeze climatologies and interactions on coasts in the southern North Sea: implications for offshore wind energy. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(690), 1821-1835.

The COMET Program. (2016). *Forzamiento térmico de la circulación I: Brisas marinas*. En: <http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/seabreezes/index.htm>
Consultado el 11 de Marzo de 2016.

Trimble M., Ríos M., Passadore C., Szephegyi M., Nin M., García Olaso F., Fagúndez C. y Laporta P. (2010). *Ecosistemas Costeros Uruguayos: Una guía para su conocimiento*. Editorial Monteverde.

Walsh, J. E. (1974). Sea breeze theory and applications. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(8), 2012-2026.

Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.

Zechmeister, M., y Kürster, M. (2009). The generalised Lomb-Scargle periodogram-a new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms. *Astronomy & Astrophysics*, 496(2), 577-584.

ANEXO I: Fotografías de un caso de brisa marina

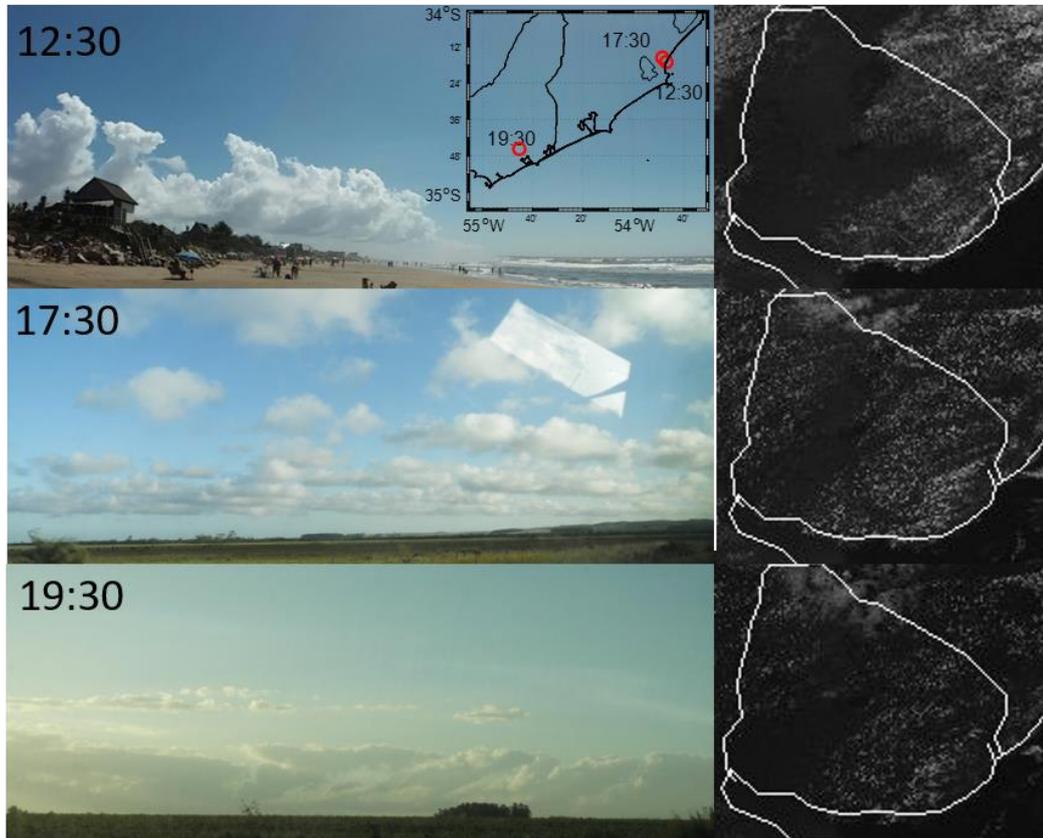


Figura A1. Fotografías e imagen satelital correspondiente al 21 de febrero de 2016. Horario en UTC-2. El mapa sobre la fotografía a las 12:30 muestra los lugares donde fueron tomadas. Durante este día se registró un evento de brisa marina en la costa atlántica uruguaya. Se observa el desarrollo de nubosidad sobre la tierra que crece con el paso de las horas. Con el ingreso de la brisa marina esta nubosidad va siendo desplazada tierra adentro.

ANEXO II: Días con brisa marina

Tabla A1. Valor del Índice de Identificación de brisa marina generalizada (IIBG) para cada día en el que el resultado fue distinto de 0. El IIBG se calcula según el Índice de Identificación de Brisa Marina por estación para las 8 estaciones seleccionadas a lo largo de la costa uruguaya como el promedio de los días con dato adquiriendo el valor 1 o 0 para día con y sin brisa marina respectivamente. Se asumió como brisa generalizada aquellos días donde al menos la mitad de las estaciones con dato obtuvieron valor 1 y se marcaron en negrita ($>0,5$). La tabla esta ordenada según el valor del índice. En los 2192 días analizados en el periodo 01/01/2011 al 31/12/2016 ocurrieron 312 días con brisa generalizada y 1285 días en el que al menos en 1 estación de las 8 se registró un evento de brisa marina. A su vez, las fechas en negrita distinguen aquellos días seleccionados para el análisis del frente de brisa por satélite. Estos días fueron días de IBBG positivo.

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
1/1/2011	0,25	24/2/2011	0,125	26/4/2011	0,143	16/7/2011	0,125
2/1/2011	0,25	26/2/2011	0,143	27/4/2011	0,125	17/7/2011	0,75
3/1/2011	0,143	27/2/2011	0,375	28/4/2011	0,125	21/7/2011	0,125
5/1/2011	0,5	28/2/2011	0,857	29/4/2011	0,125	23/7/2011	0,125
6/1/2011	0,375	1/3/2011	0,375	30/4/2011	0,125	24/7/2011	0,125
7/1/2011	0,25	2/3/2011	0,125	4/5/2011	0,125	27/7/2011	0,125
8/1/2011	0,375	3/3/2011	0,429	6/5/2011	0,125	28/7/2011	0,286
9/1/2011	0,25	4/3/2011	1	8/5/2011	0,286	1/8/2011	0,5
10/1/2011	0,125	5/3/2011	0,375	10/5/2011	0,125	7/8/2011	0,25
12/1/2011	0,125	6/3/2011	0,25	11/5/2011	0,125	12/8/2011	0,375
13/1/2011	0,875	7/3/2011	0,25	13/5/2011	0,375	14/8/2011	0,375
14/1/2011	0,625	8/3/2011	0,429	14/5/2011	0,25	16/8/2011	0,125
15/1/2011	0,25	9/3/2011	0,143	15/5/2011	0,375	17/8/2011	0,125
16/1/2011	0,25	10/3/2011	0,375	16/5/2011	0,375	22/8/2011	0,375
17/1/2011	0,125	13/3/2011	0,125	17/5/2011	0,375	23/8/2011	0,625
18/1/2011	0,5	15/3/2011	0,625	18/5/2011	0,375	25/8/2011	0,5
19/1/2011	0,125	16/3/2011	0,6	19/5/2011	0,25	28/8/2011	0,125
21/1/2011	0,625	18/3/2011	0,25	21/5/2011	0,125	29/8/2011	0,125
22/1/2011	0,625	19/3/2011	0,125	27/5/2011	0,143	30/8/2011	0,375
23/1/2011	0,25	21/3/2011	0,375	28/5/2011	0,125	1/9/2011	0,375
24/1/2011	0,375	22/3/2011	0,125	29/5/2011	0,25	4/9/2011	0,375
25/1/2011	0,625	23/3/2011	0,25	30/5/2011	0,25	5/9/2011	0,125
27/1/2011	0,125	26/3/2011	0,625	31/5/2011	0,5	6/9/2011	0,375
28/1/2011	0,75	28/3/2011	0,5	6/6/2011	0,167	7/9/2011	0,125
30/1/2011	0,5	29/3/2011	0,375	9/6/2011	0,375	8/9/2011	0,25
31/1/2011	0,125	30/3/2011	0,5	14/6/2011	0,375	10/9/2011	0,5
2/2/2011	0,5	31/3/2011	0,125	17/6/2011	0,25	12/9/2011	0,143
3/2/2011	0,125	1/4/2011	0,75	20/6/2011	0,125	14/9/2011	0,25
5/2/2011	0,875	2/4/2011	0,5	22/6/2011	0,125	17/9/2011	0,143
7/2/2011	0,375	3/4/2011	0,143	23/6/2011	0,375	19/9/2011	0,286
8/2/2011	0,125	5/4/2011	0,5	25/6/2011	0,167	20/9/2011	0,25
11/2/2011	0,375	8/4/2011	0,125	30/6/2011	0,375	21/9/2011	0,125
12/2/2011	0,75	9/4/2011	0,375	1/7/2011	0,25	22/9/2011	0,25
13/2/2011	0,5	10/4/2011	0,25	2/7/2011	0,375	24/9/2011	0,25
15/2/2011	0,5	11/4/2011	0,375	3/7/2011	0,25	25/9/2011	0,125
16/2/2011	0,375	16/4/2011	0,25	5/7/2011	0,25	26/9/2011	0,375
18/2/2011	0,429	17/4/2011	0,125	8/7/2011	0,125	27/9/2011	0,125
19/2/2011	0,625	19/4/2011	0,125	10/7/2011	0,125	30/9/2011	0,714
20/2/2011	0,125	20/4/2011	0,25	11/7/2011	0,125	2/10/2011	0,75
21/2/2011	0,25	23/4/2011	0,125	13/7/2011	0,25	5/10/2011	0,625
22/2/2011	0,5	25/4/2011	0,125	15/7/2011	0,333	6/10/2011	0,625

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
8/10/2011	0,625	6/12/2011	0,375	28/1/2012	0,5	31/3/2012	0,2
9/10/2011	0,5	7/12/2011	0,375	29/1/2012	0,2	1/4/2012	0,4
10/10/2011	0,125	8/12/2011	0,25	30/1/2012	0,167	2/4/2012	0,8
11/10/2011	0,25	9/12/2011	0,125	2/2/2012	0,833	3/4/2012	0,8
13/10/2011	0,25	10/12/2011	0,143	3/2/2012	0,833	5/4/2012	0,4
15/10/2011	0,125	12/12/2011	0,125	4/2/2012	0,25	6/4/2012	0,2
16/10/2011	0,375	13/12/2011	0,286	6/2/2012	0,333	8/4/2012	0,25
18/10/2011	0,375	14/12/2011	0,125	7/2/2012	0,167	9/4/2012	0,333
19/10/2011	0,25	19/12/2011	0,25	8/2/2012	0,167	11/4/2012	0,167
20/10/2011	0,125	20/12/2011	0,75	12/2/2012	0,2	12/4/2012	0,5
21/10/2011	0,125	21/12/2011	0,5	13/2/2012	0,5	13/4/2012	0,167
22/10/2011	0,375	22/12/2011	0,125	14/2/2012	0,5	14/4/2012	0,75
27/10/2011	0,25	23/12/2011	0,25	15/2/2012	0,5	15/4/2012	0,8
28/10/2011	0,143	25/12/2011	0,857	16/2/2012	0,5	17/4/2012	0,25
29/10/2011	0,375	26/12/2011	0,75	17/2/2012	0,167	18/4/2012	0,6
31/10/2011	0,25	27/12/2011	0,75	19/2/2012	0,2	19/4/2012	0,333
1/11/2011	0,25	28/12/2011	0,25	21/2/2012	0,167	20/4/2012	0,333
3/11/2011	0,125	29/12/2011	0,5	24/2/2012	0,5	23/4/2012	0,143
5/11/2011	0,375	30/12/2011	0,25	25/2/2012	0,2	24/4/2012	0,286
7/11/2011	0,25	31/12/2011	0,143	26/2/2012	0,4	25/4/2012	0,167
8/11/2011	0,143	2/1/2012	0,286	27/2/2012	0,167	26/4/2012	0,571
10/11/2011	0,286	4/1/2012	0,143	28/2/2012	0,167	28/4/2012	0,2
11/11/2011	0,667	5/1/2012	0,571	29/2/2012	0,833	29/4/2012	0,167
12/11/2011	0,429	6/1/2012	0,714	1/3/2012	0,333	30/4/2012	0,143
13/11/2011	0,429	8/1/2012	0,5	2/3/2012	0,5	1/5/2012	0,143
14/11/2011	0,143	10/1/2012	0,286	4/3/2012	0,2	5/5/2012	0,857
15/11/2011	0,571	11/1/2012	0,286	5/3/2012	0,167	8/5/2012	0,429
16/11/2011	0,143	13/1/2012	0,143	6/3/2012	0,833	10/5/2012	0,429
17/11/2011	0,286	14/1/2012	0,833	8/3/2012	0,5	11/5/2012	0,143
19/11/2011	0,25	15/1/2012	0,667	9/3/2012	0,167	12/5/2012	0,143
20/11/2011	0,125	16/1/2012	0,857	10/3/2012	0,2	13/5/2012	0,286
21/11/2011	0,125	17/1/2012	0,714	14/3/2012	0,167	15/5/2012	0,143
23/11/2011	0,25	18/1/2012	0,286	16/3/2012	0,167	16/5/2012	0,143
24/11/2011	0,286	19/1/2012	0,571	17/3/2012	0,6	18/5/2012	0,143
25/11/2011	0,125	20/1/2012	0,857	19/3/2012	0,333	19/5/2012	0,286
28/11/2011	0,25	21/1/2012	0,333	20/3/2012	0,333	20/5/2012	0,167
29/11/2011	0,125	22/1/2012	0,167	21/3/2012	0,6	21/5/2012	0,167
30/11/2011	0,25	23/1/2012	0,286	22/3/2012	0,667	25/5/2012	0,429
2/12/2011	0,5	24/1/2012	0,857	24/3/2012	0,2	26/5/2012	0,286
3/12/2011	0,25	26/1/2012	0,429	26/3/2012	0,5	29/5/2012	0,286
4/12/2011	0,375	27/1/2012	0,429	30/3/2012	0,6	31/5/2012	0,286

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
4/6/2012	0,143	22/8/2012	0,286	29/10/2012	0,143	9/1/2013	0,143
6/6/2012	0,857	24/8/2012	0,286	31/10/2012	0,429	10/1/2013	0,429
8/6/2012	0,286	28/8/2012	0,143	1/11/2012	0,429	11/1/2013	0,625
10/6/2012	0,143	29/8/2012	0,333	2/11/2012	0,571	12/1/2013	0,625
11/6/2012	0,167	31/8/2012	0,286	3/11/2012	0,429	13/1/2013	0,5
14/6/2012	0,167	2/9/2012	0,714	5/11/2012	0,286	14/1/2013	0,875
15/6/2012	0,143	11/9/2012	0,429	7/11/2012	0,286	15/1/2013	0,625
17/6/2012	0,429	12/9/2012	0,429	8/11/2012	0,286	16/1/2013	0,5
18/6/2012	0,286	13/9/2012	0,429	9/11/2012	0,714	17/1/2013	0,571
22/6/2012	0,286	14/9/2012	0,143	13/11/2012	0,286	18/1/2013	0,125
24/6/2012	0,429	15/9/2012	0,143	14/11/2012	0,143	19/1/2013	0,375
25/6/2012	0,286	16/9/2012	0,286	15/11/2012	0,143	20/1/2013	0,375
28/6/2012	0,429	19/9/2012	0,286	16/11/2012	0,143	21/1/2013	0,5
29/6/2012	0,143	20/9/2012	0,143	17/11/2012	0,143	22/1/2013	0,375
30/6/2012	0,167	21/9/2012	0,143	18/11/2012	0,286	24/1/2013	0,286
2/7/2012	0,167	22/9/2012	0,143	19/11/2012	0,429	26/1/2013	0,375
4/7/2012	0,571	24/9/2012	0,714	20/11/2012	0,571	28/1/2013	0,125
6/7/2012	0,286	27/9/2012	0,714	24/11/2012	0,286	30/1/2013	0,375
9/7/2012	0,286	29/9/2012	0,143	25/11/2012	0,429	31/1/2013	0,25
10/7/2012	0,429	30/9/2012	0,714	26/11/2012	0,333	1/2/2013	0,125
12/7/2012	0,286	1/10/2012	0,143	27/11/2012	0,429	2/2/2013	0,75
13/7/2012	0,286	3/10/2012	0,571	28/11/2012	0,286	4/2/2013	0,75
16/7/2012	0,429	6/10/2012	0,143	1/12/2012	0,143	5/2/2013	0,625
17/7/2012	0,571	7/10/2012	0,286	3/12/2012	0,286	6/2/2013	0,375
19/7/2012	0,143	9/10/2012	0,143	4/12/2012	0,286	7/2/2013	0,625
21/7/2012	0,286	11/10/2012	0,286	5/12/2012	0,571	8/2/2013	0,5
22/7/2012	0,143	12/10/2012	0,143	8/12/2012	0,286	9/2/2013	0,375
24/7/2012	0,143	13/10/2012	0,429	10/12/2012	0,714	10/2/2013	0,143
26/7/2012	0,143	14/10/2012	0,286	14/12/2012	0,167	11/2/2013	0,143
29/7/2012	0,143	15/10/2012	0,143	16/12/2012	0,286	12/2/2013	0,5
30/7/2012	0,571	17/10/2012	0,286	18/12/2012	0,571	14/2/2013	0,5
2/8/2012	0,286	18/10/2012	0,143	19/12/2012	0,143	15/2/2013	0,625
3/8/2012	0,143	19/10/2012	0,143	20/12/2012	0,429	16/2/2013	0,125
6/8/2012	0,429	20/10/2012	0,571	21/12/2012	0,571	17/2/2013	0,375
7/8/2012	0,286	21/10/2012	0,714	22/12/2012	0,714	21/2/2013	0,25
9/8/2012	0,286	22/10/2012	0,143	25/12/2012	0,286	22/2/2013	0,5
13/8/2012	0,143	23/10/2012	0,286	27/12/2012	0,286	23/2/2013	0,125
15/8/2012	0,143	24/10/2012	0,143	28/12/2012	0,286	24/2/2013	0,125
17/8/2012	0,167	26/10/2012	0,143	31/12/2012	0,571	26/2/2013	0,125
19/8/2012	0,286	27/10/2012	0,429	3/1/2013	0,714	27/2/2013	0,143
21/8/2012	0,143	28/10/2012	0,143	4/1/2013	0,429	28/2/2013	0,875

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
1/3/2013	0,375	26/4/2013	0,143	28/7/2013	0,571	19/10/2013	0,571
2/3/2013	0,25	27/4/2013	0,375	29/7/2013	0,333	22/10/2013	0,429
4/3/2013	0,125	28/4/2013	0,125	3/8/2013	0,143	23/10/2013	0,714
5/3/2013	0,125	29/4/2013	0,571	4/8/2013	0,143	26/10/2013	0,2
7/3/2013	0,125	30/4/2013	0,167	8/8/2013	0,143	28/10/2013	0,571
8/3/2013	0,125	1/5/2013	0,125	9/8/2013	0,143	29/10/2013	0,571
9/3/2013	0,125	3/5/2013	0,125	12/8/2013	0,143	30/10/2013	0,286
10/3/2013	0,25	4/5/2013	0,125	14/8/2013	0,143	1/11/2013	0,143
11/3/2013	0,375	5/5/2013	0,143	15/8/2013	0,143	2/11/2013	0,167
13/3/2013	0,75	12/5/2013	0,143	17/8/2013	0,286	15/11/2013	0,429
14/3/2013	0,286	13/5/2013	0,286	20/8/2013	0,429	17/11/2013	0,429
15/3/2013	0,625	14/5/2013	0,625	21/8/2013	0,333	19/11/2013	0,143
16/3/2013	0,25	15/5/2013	0,25	24/8/2013	0,286	20/11/2013	0,143
17/3/2013	0,25	18/5/2013	0,143	30/8/2013	0,143	22/11/2013	0,286
18/3/2013	0,5	19/5/2013	0,125	31/8/2013	0,143	26/11/2013	0,143
21/3/2013	0,429	20/5/2013	0,25	1/9/2013	0,571	27/11/2013	0,286
22/3/2013	0,25	21/5/2013	0,125	2/9/2013	0,571	1/12/2013	0,143
23/3/2013	0,25	22/5/2013	0,25	4/9/2013	0,571	5/12/2013	0,429
24/3/2013	0,5	23/5/2013	0,25	6/9/2013	0,429	6/12/2013	0,143
25/3/2013	0,125	24/5/2013	0,25	7/9/2013	0,143	8/12/2013	0,143
26/3/2013	0,125	27/5/2013	0,429	11/9/2013	0,143	11/12/2013	0,667
27/3/2013	0,625	29/5/2013	0,625	12/9/2013	0,571	12/12/2013	0,167
28/3/2013	0,25	2/6/2013	0,25	18/9/2013	0,286	13/12/2013	0,333
29/3/2013	0,143	8/6/2013	0,125	20/9/2013	0,143	14/12/2013	0,167
30/3/2013	0,125	9/6/2013	0,143	21/9/2013	0,714	15/12/2013	0,667
31/3/2013	0,5	10/6/2013	0,125	25/9/2013	0,143	16/12/2013	0,833
4/4/2013	0,286	16/6/2013	0,625	26/9/2013	0,571	17/12/2013	0,5
6/4/2013	0,25	17/6/2013	0,25	27/9/2013	0,333	18/12/2013	0,833
8/4/2013	0,125	20/6/2013	0,125	29/9/2013	0,143	19/12/2013	0,167
9/4/2013	0,429	21/6/2013	0,286	30/9/2013	0,286	21/12/2013	0,833
10/4/2013	0,375	22/6/2013	0,125	1/10/2013	0,143	22/12/2013	0,2
14/4/2013	0,125	23/6/2013	0,5	2/10/2013	0,143	23/12/2013	0,5
15/4/2013	0,25	24/6/2013	0,5	3/10/2013	0,286	25/12/2013	0,5
17/4/2013	0,125	5/7/2013	0,143	5/10/2013	0,286	26/12/2013	0,5
19/4/2013	0,125	6/7/2013	0,667	6/10/2013	0,286	27/12/2013	0,333
20/4/2013	0,25	8/7/2013	0,286	7/10/2013	0,429	28/12/2013	0,167
21/4/2013	0,625	10/7/2013	0,571	13/10/2013	0,286	29/12/2013	0,5
22/4/2013	0,25	11/7/2013	0,143	15/10/2013	0,571	30/12/2013	0,5
23/4/2013	0,143	14/7/2013	0,143	16/10/2013	0,429	1/1/2014	0,333
24/4/2013	0,125	20/7/2013	0,143	17/10/2013	0,286	2/1/2014	0,2
25/4/2013	0,125	27/7/2013	0,143	18/10/2013	0,143	5/1/2014	0,667

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
7/1/2014	0,167	17/3/2014	0,167	9/6/2014	0,167	23/9/2014	0,286
9/1/2014	0,167	21/3/2014	0,5	14/6/2014	0,5	25/9/2014	0,143
11/1/2014	0,167	24/3/2014	0,333	17/6/2014	0,833	27/9/2014	0,571
14/1/2014	0,5	25/3/2014	0,833	18/6/2014	0,167	30/9/2014	0,429
15/1/2014	0,167	29/3/2014	0,667	24/6/2014	0,2	2/10/2014	0,286
16/1/2014	0,667	30/3/2014	0,167	25/6/2014	0,5	6/10/2014	0,143
17/1/2014	0,167	1/4/2014	0,333	28/6/2014	0,2	8/10/2014	0,667
19/1/2014	0,2	5/4/2014	0,333	2/7/2014	0,667	11/10/2014	0,167
20/1/2014	0,167	6/4/2014	0,333	3/7/2014	0,167	12/10/2014	0,667
23/1/2014	0,167	9/4/2014	0,167	9/7/2014	0,667	14/10/2014	0,167
24/1/2014	0,833	10/4/2014	0,4	14/7/2014	0,5	15/10/2014	0,5
26/1/2014	0,167	12/4/2014	0,333	16/7/2014	0,333	16/10/2014	0,333
28/1/2014	0,167	14/4/2014	0,167	18/7/2014	0,5	18/10/2014	0,167
29/1/2014	0,167	17/4/2014	0,667	27/7/2014	0,4	24/10/2014	0,2
4/2/2014	0,5	19/4/2014	0,333	28/7/2014	0,2	25/10/2014	0,833
5/2/2014	0,167	20/4/2014	0,5	2/8/2014	0,167	26/10/2014	0,167
8/2/2014	0,5	21/4/2014	0,333	3/8/2014	0,167	28/10/2014	0,167
9/2/2014	0,167	23/4/2014	0,5	10/8/2014	0,333	30/10/2014	0,2
10/2/2014	0,25	24/4/2014	0,333	11/8/2014	0,2	31/10/2014	0,167
12/2/2014	0,167	26/4/2014	0,5	12/8/2014	0,833	5/11/2014	0,833
13/2/2014	0,167	28/4/2014	0,167	17/8/2014	0,167	6/11/2014	0,167
17/2/2014	0,167	29/4/2014	0,6	19/8/2014	0,333	8/11/2014	0,667
19/2/2014	0,4	30/4/2014	0,333	22/8/2014	0,333	11/11/2014	0,5
20/2/2014	0,333	4/5/2014	0,5	24/8/2014	0,833	12/11/2014	0,667
21/2/2014	1	5/5/2014	0,667	28/8/2014	0,333	19/11/2014	0,167
22/2/2014	0,167	6/5/2014	0,333	29/8/2014	0,167	20/11/2014	0,5
23/2/2014	0,6	7/5/2014	0,167	30/8/2014	0,167	24/11/2014	0,167
24/2/2014	0,667	10/5/2014	0,333	31/8/2014	0,2	26/11/2014	0,4
27/2/2014	0,167	13/5/2014	0,167	1/9/2014	0,5	27/11/2014	0,714
28/2/2014	0,167	15/5/2014	0,4	6/9/2014	0,667	28/11/2014	0,714
1/3/2014	0,5	17/5/2014	0,167	8/9/2014	0,333	4/12/2014	0,143
2/3/2014	0,833	19/5/2014	0,4	9/9/2014	0,333	5/12/2014	0,286
3/3/2014	0,167	20/5/2014	0,333	10/9/2014	0,167	7/12/2014	0,167
5/3/2014	0,333	22/5/2014	0,167	11/9/2014	0,2	8/12/2014	0,167
6/3/2014	0,167	23/5/2014	0,5	12/9/2014	0,667	10/12/2014	0,429
7/3/2014	0,167	26/5/2014	0,167	14/9/2014	0,143	12/12/2014	0,571
8/3/2014	0,167	31/5/2014	0,167	16/9/2014	0,571	13/12/2014	0,5
9/3/2014	0,333	3/6/2014	0,167	17/9/2014	0,429	15/12/2014	0,167
10/3/2014	0,167	4/6/2014	0,167	18/9/2014	0,167	16/12/2014	0,143
12/3/2014	0,2	5/6/2014	0,167	19/9/2014	0,429	17/12/2014	0,333
13/3/2014	0,833	6/6/2014	0,333	22/9/2014	0,143	20/12/2014	0,333

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
21/12/2014	0,167	11/2/2015	0,286	1/4/2015	0,333	11/6/2015	0,625
22/12/2014	0,667	14/2/2015	0,714	4/4/2015	0,333	13/6/2015	0,125
24/12/2014	0,286	15/2/2015	0,143	7/4/2015	0,8	14/6/2015	0,429
25/12/2014	0,333	16/2/2015	0,286	8/4/2015	0,5	15/6/2015	0,125
26/12/2014	0,429	17/2/2015	0,286	10/4/2015	0,167	17/6/2015	0,25
27/12/2014	0,286	18/2/2015	0,286	12/4/2015	0,833	20/6/2015	0,125
28/12/2014	0,143	19/2/2015	0,571	13/4/2015	0,167	22/6/2015	0,625
29/12/2014	0,714	21/2/2015	0,286	14/4/2015	0,333	24/6/2015	0,125
30/12/2014	0,167	22/2/2015	0,857	20/4/2015	0,167	26/6/2015	0,125
31/12/2014	0,429	23/2/2015	0,714	21/4/2015	0,667	30/6/2015	0,75
1/1/2015	0,286	24/2/2015	0,714	22/4/2015	0,429	1/7/2015	0,143
4/1/2015	0,143	25/2/2015	0,833	25/4/2015	0,143	2/7/2015	0,25
7/1/2015	0,286	26/2/2015	0,714	26/4/2015	0,143	3/7/2015	0,75
8/1/2015	0,857	28/2/2015	0,571	27/4/2015	0,143	5/7/2015	0,125
9/1/2015	0,143	1/3/2015	0,286	30/4/2015	0,429	7/7/2015	0,25
10/1/2015	0,143	2/3/2015	0,143	1/5/2015	0,429	8/7/2015	0,25
11/1/2015	0,286	3/3/2015	0,714	2/5/2015	0,143	10/7/2015	0,286
12/1/2015	0,143	4/3/2015	0,429	3/5/2015	0,143	11/7/2015	0,125
14/1/2015	0,286	6/3/2015	0,667	4/5/2015	0,333	12/7/2015	0,125
15/1/2015	0,143	7/3/2015	0,667	6/5/2015	0,286	13/7/2015	0,125
16/1/2015	0,143	8/3/2015	0,5	7/5/2015	0,143	15/7/2015	0,125
17/1/2015	0,286	9/3/2015	0,667	8/5/2015	0,143	16/7/2015	0,125
18/1/2015	0,167	10/3/2015	0,2	9/5/2015	0,429	17/7/2015	0,375
19/1/2015	0,429	11/3/2015	0,6	10/5/2015	0,571	18/7/2015	0,25
21/1/2015	0,714	12/3/2015	0,6	11/5/2015	0,286	19/7/2015	0,625
22/1/2015	0,5	13/3/2015	0,2	12/5/2015	0,286	21/7/2015	0,25
23/1/2015	0,143	14/3/2015	0,6	13/5/2015	0,143	22/7/2015	0,125
24/1/2015	0,429	15/3/2015	0,667	16/5/2015	0,143	24/7/2015	0,75
25/1/2015	0,571	16/3/2015	0,833	17/5/2015	0,286	25/7/2015	0,125
26/1/2015	0,571	17/3/2015	0,667	18/5/2015	0,143	26/7/2015	0,125
28/1/2015	0,143	18/3/2015	0,5	20/5/2015	0,143	29/7/2015	0,25
30/1/2015	0,714	19/3/2015	0,333	23/5/2015	0,25	30/7/2015	0,286
31/1/2015	0,714	20/3/2015	0,167	26/5/2015	0,25	1/8/2015	0,286
1/2/2015	0,286	23/3/2015	0,333	28/5/2015	0,125	4/8/2015	0,125
2/2/2015	0,143	24/3/2015	0,833	29/5/2015	0,375	7/8/2015	0,125
3/2/2015	0,143	25/3/2015	0,167	3/6/2015	0,143	9/8/2015	0,125
5/2/2015	0,571	27/3/2015	0,5	4/6/2015	0,125	10/8/2015	0,375
6/2/2015	0,429	28/3/2015	0,833	6/6/2015	0,625	11/8/2015	0,375
7/2/2015	0,714	29/3/2015	0,333	7/6/2015	0,125	14/8/2015	0,143
8/2/2015	0,429	30/3/2015	0,167	8/6/2015	0,25	15/8/2015	0,125
10/2/2015	0,286	31/3/2015	0,5	9/6/2015	0,125	16/8/2015	0,375

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
18/8/2015	0,125	27/10/2015	0,125	23/12/2015	0,125	19/2/2016	0,25
20/8/2015	0,125	29/10/2015	0,125	25/12/2015	0,25	20/2/2016	0,125
23/8/2015	0,125	30/10/2015	0,25	26/12/2015	0,375	21/2/2016	0,375
24/8/2015	0,125	1/11/2015	0,125	27/12/2015	0,125	22/2/2016	0,375
26/8/2015	0,125	2/11/2015	0,125	28/12/2015	0,25	23/2/2016	0,25
27/8/2015	0,125	3/11/2015	0,125	30/12/2015	0,125	24/2/2016	0,75
28/8/2015	0,125	5/11/2015	0,429	1/1/2016	0,625	26/2/2016	0,125
30/8/2015	0,375	6/11/2015	0,25	2/1/2016	0,25	28/2/2016	0,375
31/8/2015	0,375	7/11/2015	0,875	3/1/2016	0,143	29/2/2016	0,875
2/9/2015	0,375	8/11/2015	0,25	5/1/2016	0,5	1/3/2016	0,286
3/9/2015	0,25	9/11/2015	0,5	8/1/2016	0,5	3/3/2016	0,5
4/9/2015	0,125	10/11/2015	0,25	9/1/2016	0,75	4/3/2016	0,571
5/9/2015	0,125	11/11/2015	0,125	10/1/2016	0,5	5/3/2016	0,375
6/9/2015	0,25	12/11/2015	0,5	11/1/2016	0,5	6/3/2016	0,25
8/9/2015	0,143	13/11/2015	0,25	12/1/2016	0,25	7/3/2016	0,125
9/9/2015	0,286	15/11/2015	0,25	15/1/2016	0,625	8/3/2016	0,75
10/9/2015	0,5	17/11/2015	0,125	16/1/2016	0,5	9/3/2016	0,875
11/9/2015	0,143	19/11/2015	0,875	18/1/2016	0,125	11/3/2016	0,25
12/9/2015	0,286	21/11/2015	0,25	19/1/2016	0,75	12/3/2016	0,125
13/9/2015	0,286	22/11/2015	0,75	21/1/2016	0,375	13/3/2016	0,375
17/9/2015	0,375	23/11/2015	0,125	23/1/2016	0,125	14/3/2016	0,625
18/9/2015	0,5	24/11/2015	0,25	25/1/2016	0,25	16/3/2016	0,5
19/9/2015	0,625	25/11/2015	0,25	26/1/2016	0,375	17/3/2016	0,25
20/9/2015	0,375	29/11/2015	0,25	27/1/2016	0,25	18/3/2016	0,25
26/9/2015	0,375	30/11/2015	0,75	28/1/2016	0,375	19/3/2016	0,125
27/9/2015	0,375	1/12/2015	0,25	30/1/2016	0,25	22/3/2016	0,375
29/9/2015	0,75	2/12/2015	0,5	1/2/2016	0,125	23/3/2016	0,125
30/9/2015	0,25	3/12/2015	0,25	2/2/2016	0,375	24/3/2016	0,75
1/10/2015	0,25	4/12/2015	0,5	3/2/2016	0,375	29/3/2016	0,25
2/10/2015	0,125	7/12/2015	0,25	4/2/2016	0,375	30/3/2016	0,5
5/10/2015	0,375	8/12/2015	0,125	5/2/2016	0,875	31/3/2016	0,5
6/10/2015	0,25	9/12/2015	0,25	6/2/2016	0,5	1/4/2016	0,25
7/10/2015	0,125	11/12/2015	0,125	8/2/2016	0,125	3/4/2016	0,25
13/10/2015	0,25	12/12/2015	0,375	9/2/2016	0,25	5/4/2016	0,286
14/10/2015	0,125	13/12/2015	0,375	10/2/2016	0,5	6/4/2016	0,143
15/10/2015	0,375	14/12/2015	0,429	11/2/2016	0,286	7/4/2016	0,429
18/10/2015	0,5	16/12/2015	0,25	13/2/2016	0,125	8/4/2016	0,429
20/10/2015	0,625	17/12/2015	0,125	14/2/2016	0,25	9/4/2016	0,143
21/10/2015	0,5	18/12/2015	0,625	15/2/2016	0,625	13/4/2016	0,143
22/10/2015	0,25	19/12/2015	0,125	17/2/2016	0,125	15/4/2016	0,125
26/10/2015	0,25	20/12/2015	0,75	18/2/2016	0,875	16/4/2016	0,125

Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG	Fecha	IIBG
17/4/2016	0,5	2/7/2016	0,125	7/10/2016	0,125	16/12/2016	0,125
19/4/2016	0,25	5/7/2016	0,125	10/10/2016	0,25	17/12/2016	0,25
21/4/2016	0,625	11/7/2016	0,125	12/10/2016	0,125	18/12/2016	0,25
22/4/2016	0,125	12/7/2016	0,375	13/10/2016	0,125	19/12/2016	0,125
24/4/2016	0,125	13/7/2016	0,375	14/10/2016	0,125	20/12/2016	0,5
26/4/2016	0,143	15/7/2016	0,286	19/10/2016	0,125	21/12/2016	0,375
29/4/2016	0,375	16/7/2016	0,143	22/10/2016	0,5	22/12/2016	0,25
2/5/2016	0,125	18/7/2016	0,143	23/10/2016	0,625	23/12/2016	0,375
5/5/2016	0,5	20/7/2016	0,286	26/10/2016	0,5	24/12/2016	0,625
6/5/2016	0,125	21/7/2016	0,167	29/10/2016	0,375	25/12/2016	0,125
7/5/2016	0,125	26/7/2016	0,25	30/10/2016	0,125	28/12/2016	0,5
8/5/2016	0,25	28/7/2016	0,143	1/11/2016	0,125	29/12/2016	0,5
9/5/2016	0,5	29/7/2016	0,375	3/11/2016	0,125	30/12/2016	0,125
10/5/2016	0,25	31/7/2016	0,125	5/11/2016	0,25	31/12/2016	0,25
12/5/2016	0,125	2/8/2016	0,125	6/11/2016	0,25		
13/5/2016	0,125	3/8/2016	0,125	7/11/2016	0,375		
14/5/2016	0,125	5/8/2016	0,286	9/11/2016	0,375		
15/5/2016	0,375	6/8/2016	0,125	12/11/2016	0,125		
18/5/2016	0,125	7/8/2016	0,125	13/11/2016	0,125		
19/5/2016	0,25	8/8/2016	0,125	14/11/2016	0,125		
20/5/2016	0,875	9/8/2016	0,375	15/11/2016	0,375		
23/5/2016	0,25	15/8/2016	0,571	17/11/2016	0,375		
24/5/2016	0,125	17/8/2016	0,143	19/11/2016	0,125		
26/5/2016	0,125	19/8/2016	0,286	20/11/2016	0,125		
28/5/2016	0,125	20/8/2016	0,125	22/11/2016	0,25		
4/6/2016	0,125	24/8/2016	0,25	23/11/2016	0,125		
5/6/2016	0,125	25/8/2016	0,125	24/11/2016	0,625		
7/6/2016	0,375	26/8/2016	0,25	25/11/2016	0,125		
8/6/2016	0,125	31/8/2016	0,143	27/11/2016	0,625		
9/6/2016	0,125	5/9/2016	0,125	28/11/2016	0,571		
12/6/2016	0,125	6/9/2016	0,25	29/11/2016	0,375		
13/6/2016	0,125	11/9/2016	0,25	1/12/2016	0,25		
16/6/2016	0,125	21/9/2016	0,143	2/12/2016	0,125		
17/6/2016	0,125	25/9/2016	0,286	3/12/2016	1		
19/6/2016	0,25	26/9/2016	0,375	4/12/2016	0,25		
21/6/2016	0,25	27/9/2016	0,25	5/12/2016	0,125		
22/6/2016	0,25	28/9/2016	0,75	6/12/2016	0,125		
24/6/2016	0,25	2/10/2016	0,25	7/12/2016	0,375		
25/6/2016	0,25	3/10/2016	0,125	9/12/2016	0,375		
27/6/2016	0,143	4/10/2016	0,125	11/12/2016	0,125		
29/6/2016	0,25	6/10/2016	0,75	15/12/2016	0,375		