



Universidad Autónoma de Baja California



Facultad de Ciencias Marinas

**“Dispersión Lagrangiana superficial en la Bahía Todos Santos, B.C., bajo
condiciones de vientos Santa Ana”**

Tesis

Para obtener el título de: Oceanólogo

Presenta: Andrés Romero Guevara

Director de Tesis:

Mauro Wilfrido Santiago García

Codirector de Tesis:

Jorge Alejandro Kurczin Robledo

Ensenada, B.C., México

“Dispersión Lagrangiana superficial en la Bahía Todos Santos, B.C., bajo condiciones de vientos Santa Ana”

Resumen

La Bahía Todos Santos es un cuerpo costero que se comunica con el océano Pacífico a través de dos bocas. En promedio, la circulación superficial de la bahía tiene una tendencia de girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, las velocidades son del orden de $\sim 10 \text{ cm s}^{-1}$. El patrón de viento predominante en la región es del noroeste, sin embargo, en los meses de invierno se presentan vientos cálidos y de baja humedad, que soplan hacia fuera de la costa en dirección perpendicular a la línea de costa, y son capaces de modificar la circulación superficial de la bahía. El efecto de estos vientos sobre la dispersión de trazadores en la bahía no se ha estudiado con suficiente detalle. Este trabajo se enfocó principalmente de analizar los patrones de dispersión superficial en condiciones de vientos Santa Ana. Para dispersar las partículas Lagrangianas se utilizó un modelo de advección-difusión, usando campos de velocidad obtenidos de radares de alta frecuencia. Las partículas se liberaron en seis puntos, cuatro en la región central y dos en la zona de la Isla Todos Santos. Los patrones de dispersión en la región central de la bahía mostraron un transporte dominante hacia el oeste, cuya trayectoria fue de aproximadamente la mitad de la dimensión de la bahía en un período de 12 h.

Palabras clave: Dispersión lagrangiana, vientos de Santa Ana, modelo de advección-difusión, elipses de variabilidad.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
CAMPUS ENSENADA**



"Dispersión Lagrangiana superficial en la Bahía Todos Santos, B.C., bajo condiciones de vientos Santa Ana "

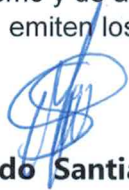
TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Oceanólogo

PRESENTA:

**Andrés Romero Guevara
354080**

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:


**Mauro Wilfrido Santiago Garcia
DIRECTOR**


**Jorge Alejandro Kurczyn Robledo
Codirector**


**Ana Laura Flores Morales
SINODAL**


**Reginaldo Durazo Arvizu
SINODAL**


**Rubén Castro Valdez
SECRETARIO**

"Por la Realización Plena del Ser"

Dedicatoria

A mi familia:

A mi papá, mamá y hermano, pese a la distancia siempre me han apoyado.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California por brindarme la formación y sólidas experiencias de aprendizaje.

Al Dr. Mauro Wilfrido Santiago García, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo, por creer en mí, su apoyo, grandes consejos, asesoría y mucha paciencia. Por todas las reuniones y disposición de su tiempo para guiarme en cada paso, sin su ayuda no se hubiera podido realizar esta tesis en el corto plazo que se planeó.

Al Dr. Jorge Alejandro Kurczyn Robledo por codirigir esta tesis, su apoyo, sus comentarios y observaciones para mejorar este trabajo, además del apoyo económico.

A mis sinodales: Rubén Castro Valdez, Ana Laura Flores Morales y Reginaldo Durazo Arvizu por aceptar formar parte de este grupo y su retroalimentación.

Al Dr. Rubén Castro Valdez y al Dr. Reginaldo Durazo Arvizu por proporcionar la base de datos en la cual se fundamentó toda esta tesis.

A todos los profesores que tuve a lo largo de la licenciatura que me fueron orientando a lo que realmente me apasiona, por su forma de enseñar la ciencia y motivarme a seguir el camino de la ciencia.

A mis padres por su amor incondicional, sus mensajes de apoyo, ser los guías de mi vida, que pese a la gran distancia siempre estuvimos unidos. Gracias por brindarme la oportunidad de perseguir mis sueños y apoyar mis decisiones.

A mi hermano por sus palabras de aliento y ser un pilar fundamental en mi vida.

A Cassandra, no hay palabras para expresar mi gratitud por apoyarme a lo largo de toda la tesis y la carrera, siempre estar ahí para mí en los momentos de duda, empujarme a dar lo mejor de mí y animarme en los momentos más duros y estresantes.

A Osi y Makki por acompañarme en las noches de desvelo.

Índice

Resumen	II
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Índice	VI
1. Introducción	1
2. Zona de estudio	3
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo general	4
3.2. Particulares	4
4. Datos y metodología	4
4.1. Base de datos	4
4.1.1. Campos de vientos y humedad relativa	4
4.1.2. Trayectorias de derivadores y campos de velocidades superficiales en el interior de la BTS	5
4.2. Identificación de vientos Santa Ana	5
4.3. Modelo de advección-difusión	6
4.4. Experimentos numéricos	6
5. Resultados	7
5.1. Análisis de vientos Santa Ana	8
5.2. Comparación de trayectorias: derivadores superficiales y partículas sintéticas	11
5.3. Patrones de circulación superficial bajo condiciones de vientos Santa Ana.	12
6. Discusiones	15
6.1. Vientos Santa Ana	15
6.2. Derivadores superficiales vs. partículas sintéticas	18
6.3. Efecto de vientos Santa Ana en el patrón de dispersión de partículas	19
7. Conclusiones	20
8. Referencias	20

1. Introducción

El análisis de trayectorias Lagrangianas (partículas o sustancias) inmersos en flujos turbulentos resulta elemental para entender y predecir el destino de las propiedades físicas, químicas y biológicas en el océano y la atmósfera. La dispersión es un proceso complejo debido a la amplia variedad de escalas espacio-temporales involucradas en la dinámica de flujos geofísicos turbulentos (Zavala Sansón, 2015).

La dispersión en el océano y la atmósfera ha sido estudiada mediante la liberación de cuerpos de deriva (globos meteorológicos, derivadores superficiales) o sustancias que son advectadas por el flujo en el que están inmersos (LaCasce, 2008). La dispersión de partículas desde la perspectiva de la modelación numérica ha sido ampliamente usada a partir de un modelo de advección-difusión (Brickman *et al.*, 2009), donde la parte advectiva corresponde al desplazamiento de partículas asociados a campos de velocidades obtenidas de modelos numéricos (oceánicos y atmosféricos), la difusión corresponde a un desplazamiento asociado a procesos de escalas que no son resueltas por los modelos numéricos.

Las propiedades de la dispersión son obtenidas a partir de estadísticas de la distribución de los cuerpos de deriva obtenidas por uno o varios experimentos, que generalmente son realizados sobre diferentes períodos. Esto permite obtener una estadística global de la dispersión (Poulain y Niiler, 1989; Zavala Sansón *et al.*, 2018), sobre escalas estacionales (Zavala-Sansón, 2015) o sobre regiones con dinámica particular (Lumpkin y Flament, 2001). Zavala Sansón y colaboradores (2017) describen una metodología para analizar la distribución espacial y temporal de partículas liberadas en fuentes puntuales, bajo diferentes condiciones de la circulación oceánica usando elipses de variabilidad, mismas que indican patrones de dispersión del conjunto de partículas respecto a la posición media en función del tiempo, bajo diferentes condiciones oceánicas y atmosféricas.

Los vientos en las costas de Baja California del lado del Pacífico provienen del Noroeste, asociado al sistema de alta presión que se encuentra en el Pacífico Norte. Sin embargo, durante invierno a verano este centro de alta presión en ocasiones migra hacia el continente, más específicamente a la región de la Gran Cuenca en California (EUA), generando vientos conocidos como vientos Santa Ana (Castro *et al.*, 2002; Rolinski *et al.*, 2019). En este documento se denotará con el acrónimo VSA a los vientos Santa Ana. Los VSA modifican el patrón dominante del viento en la región de estudio, caracterizados por ser vientos cálidos y de baja

humedad, que soplan hacia fuera de la costa en dirección perpendicular a la línea de costa, vientos provenientes del E-NE, con una duración entre 1-8 días, con velocidades medias entre 7-13 m s⁻¹ y ráfagas que pueden alcanzar los 25 m s⁻¹ en la región de California (Rolinski *et al.*, 2019).

La topografía del sur de California y de Baja California juegan un papel importante en el redireccionamiento de los VSA, provocando un incremento de temperatura y disminución de humedad en la masa de aire que transportan, llegando a afectar diferentes áreas urbanas, una de las cuales es Ensenada, Baja California (Álvarez *et al.*, 2022). En esta región se encuentra la Bahía Todos Santos (BTS), localizada en la región peninsular occidental de Baja California, la bahía es un cuerpo costero semicerrado con dimensiones de ~15 km x ~12 km, conectado con el Océano Pacífico a través de dos bocas localizados al noroeste y suroeste de la bahía (Navarro-Olache *et al.*, 2021). Diversos trabajos han documentado que los VSA modifican la circulación superficial de la BTS.

La circulación en la BTS es compleja, la circulación promedio es ciclónica en invierno en condiciones de vientos oeste y noroeste. La circulación superficial asociada a la marea tiene una rotación ciclónica en el interior de la bahía, lo que podría profundizar la termoclina y generar convergencia de agua, mientras que la circulación es opuesta (anticiclónica) en la periferia; por lo tanto, existe una región de divergencia cero, representando una barrera física en el intercambio de agua de la bahía y el océano adyacente (Flores-Vidal *et al.*, 2015). La BTS es considerada como una trampa de surgencia, donde el agua es retenida en el interior de la bahía, influenciada por la Corriente Costera de California y procesos de surgencia (Mateos *et al.* 2013; Pérez- Brunius y Calva-Chávez, 2013), lo que sugiere que la dinámica Lagrangiana local depende de las condiciones del Océano Pacífico.

Recientemente, se ha documentado que la circulación en la BTS puede ser modificada en presencia de VSA, donde los vientos del este-noreste pueden transportar el agua superficial fuera de la bahía. En general, el flujo superficial tiende a desplazarse en la misma dirección del viento e inclusive puede cambiar de una circulación ciclónica a anticiclónica (Navarro-Olache *et al.*, 2021). En consecuencia, los VSA pueden representar un mecanismo de recambio de agua de la bahía, un proceso que ha sido escasamente estudiado. Basado en análisis Lagrangiano de partículas sintéticas, advectadas con las velocidades superficiales de radares se ha estimado tiempos de residencia en la bahía entre 10 y 16 días (Cervantes-Audelo, 2014), sin embargo, el efecto de los VSA en el patrón de

dispersión de trazadores, como el tiempo de residencia dentro de la bahía no ha sido analizado con detenimiento.

En este proyecto de tesis se propone analizar la dispersión superficial de partículas sintéticas liberadas en fuentes puntuales en el interior de la BTS. La trayectoria de los trazadores será calculada mediante un modelo de advección-difusión de partículas, advectadas por los campos de velocidad superficial obtenida mediante radares de alta frecuencia en la BTS.

2. Zona de estudio

La Bahía de Todos Santos se localiza en Ensenada, Baja California, México. La bahía se caracteriza por tener dos bocas que la conectan con el Océano Pacífico, la primera se encuentra al noroeste, entre la isla de Todos Santos y San Miguel, mientras que, la segunda boca se encuentra en la parte suroeste, entre la Isla de Todos Santos y Punta Banda (Fig. 1). La bahía presenta un fondo somero, que se encuentra entre los 0 a 50 m, exceptuando en la boca suroeste, donde existe un cañón submarino, con alrededor de 390 m de profundidad. La circulación superficial del agua dentro de la bahía en promedio tiene una tendencia ciclónica, es decir una circulación en sentido antihorario (Navarro-Olache *et al.*, 2021).

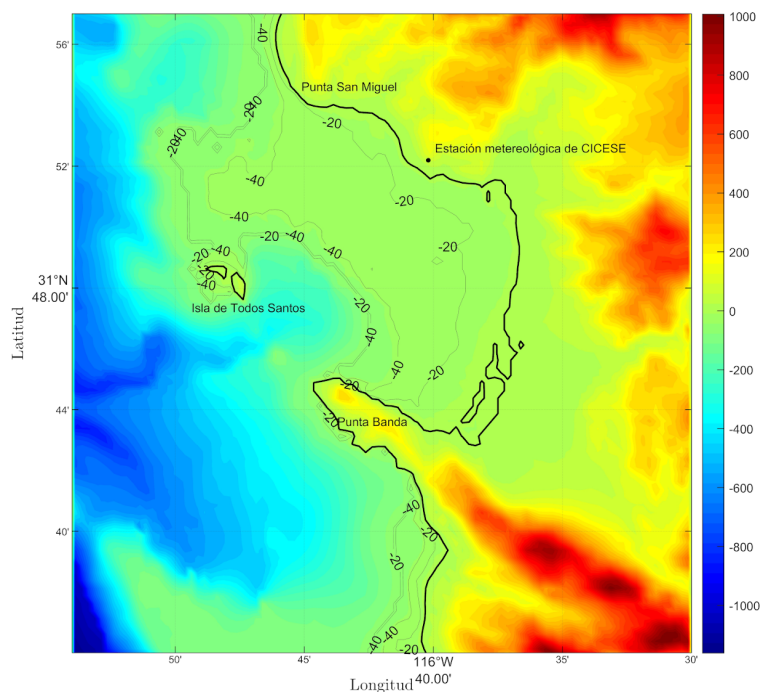


Figura 1. Localización y morfología de la Bahía de Todos Santos, Baja California. Estación meteorología de CICESE (punto negro). Los colores indican las características topográficas de la región. Las líneas sólidas muestran los contornos batimétricos de -20 y -40 m.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Avanzar en el conocimiento de la dispersión superficial del océano, y proveer información sobre escenarios de dispersión de trazadores sintéticos, bajo diferentes condiciones del estado del mar y de la atmósfera.

3.2. Particulares

- Identificar condiciones de VSA con base la humedad relativa del aire.
- Comparar las trayectorias de derivadores superficiales (boyas de deriva) vs. trayectorias sintéticas obtenidas de un modelo de advección-difusión.
- Identificar los patrones de dispersión Lagrangiana en condiciones de VSA mediante elipses de variabilidad.

4. Datos y metodología

A continuación, se describen las bases de datos y metodologías que se usarán e implementarán en este trabajo de investigación.

4.1. Base de datos

4.1.1. Campos de vientos y humedad relativa

Los campos de vientos se obtuvieron de la base de datos de ERA5¹ con una resolución temporal de 1 h, y espaciales de ~ 30 km para el período 2009-2012. Los datos de la humedad relativa a 2 m sobre la superficie se descargaron de la base de datos AgERA5² (Boogaard *et al.*, 2020) con una resolución temporal de 6 h, y espacial de $\sim 0.1^\circ$. De forma similar se obtuvieron datos de la estación meteorológica del CICESE³ para el período 2009-2019, cuya resolución temporal fue de 15 minutos.

4.1.2. Trayectorias de derivadores y campos de velocidades superficiales en el interior de la BTS

En la BTS se liberaron 40 derivadores superficiales entre junio de 2012 y septiembre de 2013 en el marco de dos proyectos de investigación: Circulación

Estacional en la BTS y Estudio de la Clasificación de Playas: Bahía de Ensenada, B. C. (Castro-Valdés, 2006). Los derivadores tipo “*Microstar*” fueron desplegados individualmente en diferentes puntos de la bahía y fueron seguidas por rastreo satelital. La posición de los derivadores fue obtenida cada 10 minutos por un período entre 2 y 8 días. Además, se cuenta con datos históricos de campos de velocidad superficial con una resolución espacial de ~ 1 km, y resolución temporal de 1 h para el período de junio de 2009 a julio de 2013, información que fue obtenida de un conjunto de dos radares de alta frecuencia operada por la Universidad Autónoma de Baja California y la Universidad de Hawái (Flores-Vidal *et al.*, 2015). Posteriormente, se instaló otro sistema de tres radares, las cuales mejoraron la cobertura espacial de mediciones para el período 2014-2020. El conjunto de mediciones directas proporciona una ventana de oportunidad para analizar la dispersión en la BTS.

Enlaces de las bases de datos

¹<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

²<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.6c68c9bb?tab=overview>

³https://observatorio.cicese.mx/cicese/Current_cicese.htm

4.2. Identificación de vientos Santa Ana

El criterio para identificar un evento de VSA se determinó a partir de la humedad relativa, este parámetro fue definido como,

$$HR_{SA} = \overline{HR_a} - \sigma_{HR} \quad (1)$$

donde $\overline{HR_a}$ es el promedio anual de la humedad relativa y σ_{HR} es la desviación estándar.

Los criterios para la identificación de los eventos de VSA se establecieron de la siguiente manera: a) humedad relativa $< HR_{SA}$, b) la condición anterior debe cumplirse en al menos 24 h de forma ininterrumpida, c) el intervalo entre eventos debe ser > 12 h. Para evaluar el método propuesto, se realizó una comparación con otros criterios que consideran la dirección e intensidad del viento, esto se realizó para el periodo del 2012.

Una vez identificados los VSA, se analizó la estadística básica de los eventos:

número de eventos mensuales, intensidad y duración. Para el registro mensual de los VSA se consideró el día que correspondió a la mitad del período de VSA, por consiguiente, el registro se realizó para el mes que correspondió el día en cuestión.

4.3. Modelo de advección-difusión

Para analizar los patrones de dispersión, las partículas fueron advectadas numéricamente por los campos de velocidades superficiales, usando el modelo numérico Connectivity Modelling System descrito por Paris y colaboradores (2013). El modelo es fundamentalmente de advección-difusión. El modelo es descrito de la siguiente forma,

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \mathbf{u}\Delta t + (2K_x/\Delta t)^{1/2} \mathbf{Q}, \quad (2)$$

donde $\mathbf{x}$ es el desplazamiento, $\mathbf{u}$ es la velocidad, Δt es el paso de tiempo, K es el coeficiente de difusión turbulento y $\mathbf{Q}$ es una variable aleatoria con media cero y varianza unitaria.

4.4. Experimentos numéricos

Para analizar el efecto de los VSA sobre la dispersión Lagrangiana se definieron los períodos de VSA y se evaluó la disponibilidad de los campos de velocidades superficiales en la BTS para los períodos de VSA.

Una vez identificados los VSA, además de evaluar la disponibilidad de los campos de velocidades en la BTS para los períodos de VSA, se eligieron los períodos con mayor cobertura espacial de datos de corrientes superficiales para la advección de partículas. Las partículas se liberarán como fuentes puntuales en el interior de la bahía. Además, se compararon trayectorias de partículas sintéticas con algunas trayectorias de derivadores. El análisis de la evolución de la distribución de las partículas se realizó con la metodología propuesta por Zavala Sansón y colaboradores (2017), la cual se describe a continuación.

La evolución temporal de los patrones de distribución de partículas liberadas en fuentes puntuales se analizará con elipses de variabilidad. Las elipses de variabilidad ofrecen información estadística de la dispersión de partículas donde la orientación del eje mayor indica la dirección preferencial de la dispersión. Las elipses son calculadas con la separación de las partículas a partir de la posición media de los derivadores,

$$\bar{X}_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[x_i^k(t) - x_i^k(t_0) \right] \quad (3)$$

Donde X_i es la posición media del conjunto (ensamble) de partículas, el subíndice i indica la dirección: zonal ($i=1$) y meridional ($i=2$), N es el número de partículas, x_i^k es la posición de la partícula k en dirección i y t es el tiempo. Para calcular los semiejes de la elipse y la orientación de la misma se utiliza la matriz de covarianza. La dispersión del conjunto de partículas respecto a la posición media es,

$$\bar{R}_i^2(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left[x_i^k(t) - x_i^k(t_0) - \bar{X}_i \right]^2 \quad (4)$$

Los semiejes de las elipses son proporcionales a la raíz cuadrada de las componentes de la dispersión relativa (ecuación 4),

$$a(\tau) = c \sqrt{\max[R_1^2(\tau), R_2^2(\tau)]}, \quad (5)$$

$$b(\tau) = c \sqrt{\min[R_1^2(\tau), R_2^2(\tau)]} \quad (6)$$

Donde el valor c determina el tamaño de la elipse. Finalmente se describe la elipse rotada en un ángulo θ con respecto a la dirección zonal, dirección definida por el autovector con el máximo autovalor de la matriz de covarianza de las posiciones.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cuatro secciones: análisis de VSA (2009-2019), comparación de trayectorias Lagrangianas (reales y sintéticas), patrones de la circulación superficial bajo condiciones de VSA y la dispersión de partículas liberadas en fuentes puntuales. Basado en un análisis preliminar se encontró que la humedad relativa de ERA5 no mostró patrones característicos de la presencia de VSA, por lo que no se utilizaron.

5.1. Análisis de vientos Santa Ana

La identificación de los eventos de VSA se basaron en la humedad relativa. El criterio se definió como condiciones características del VSA cuando la humedad relativa es menor al valor promedio menos una desviación estándar (ecuación 1),

cuyo valor fue de $\sim 55\%$. El criterio capturó razonablemente la disminución abrupta de la humedad relativa como se observa en las figuras 2 y 3, estas muestran los eventos de VSA identificados durante el período de 2009-2019. De los eventos identificados, el 46 % presentaron vientos del sector E-NE. Algunos autores definen como una condición de VSA basados en la dirección del viento (provenientes del E-NE) y la humedad relativa (Rolinski *et al.*, 2019). Sin embargo, para la BTS, las condiciones de VSA no siempre se presentan con un patrón de viento E-NE, como se discute en la sección 6.1.

Los VSA se presentaron principalmente en los meses de invierno, otoño y primavera, la mayor frecuencia e intensidad ocurrieron en los meses de invierno como se puede observar en las figuras 2 y 3, que corresponden a los eventos de VSA identificados durante el período de 2009 a 2019. Es importante resaltar que los eventos de VSA son muy escasos en los meses de verano.

El análisis de la estadística de los eventos de VSA: número, intensidad y duración de los eventos de viento para el período analizado (2009-2019), mostraron un total de 133 VSA, esto es, a razón de ~ 12 eventos por año. La mayor cantidad de eventos de VSA se presentaron en los meses de invierno: enero y diciembre (26 eventos), posteriormente disminuyeron en los meses de primavera (entre 5-11 eventos), mientras que, en verano, los eventos son escasos, como se puede observar en las figuras 2, 3 y 4. La presencia de eventos de VSA representaron $\sim 15\%$ del período analizado (~ 600 días).

La duración de los eventos de VSA fluctuaron entre 1 y ~ 22 días, con valores promedio de ~ 4 días, la mayor variabilidad en la duración de los eventos de viento se observó en los meses de invierno como se muestra en la figura 5. Es importante resaltar que únicamente se registró un evento de viento para los meses de verano (ver figura 4). La intensidad de los vientos fluctuó entre ~ 0 Y 3.5 m s^{-1} con valores promedio entre 1.5 y 2 m s^{-1} (Fig. 6). La mayor variabilidad de la intensidad de los eventos de viento se observó en el mes de diciembre con valores entre ~ 0 y $\sim 4.5 \text{ m s}^{-1}$.

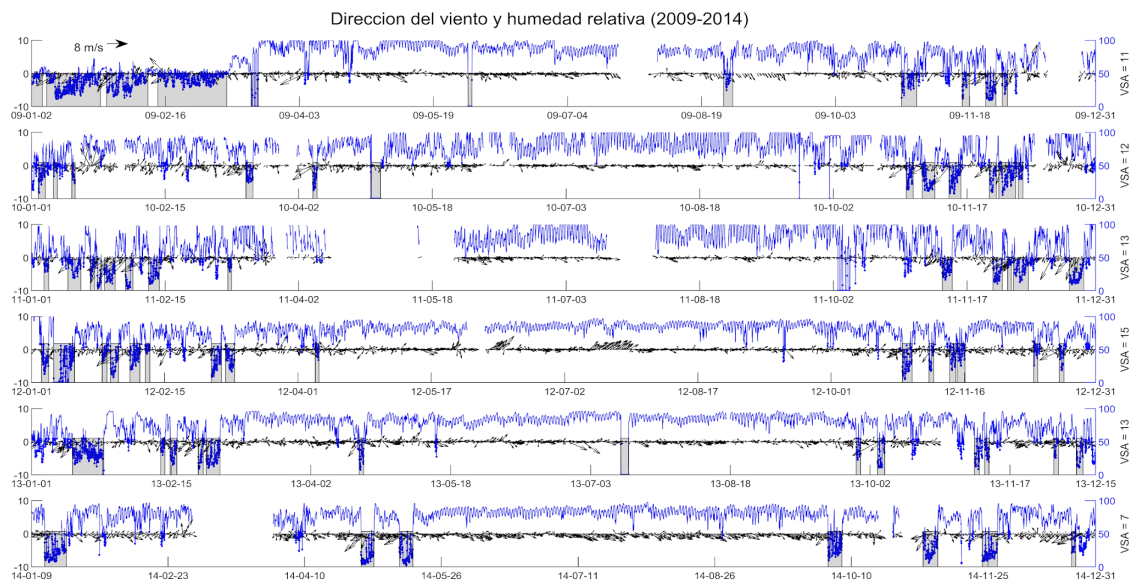


Figura 2. Campo de vientos (vectores) y humedad relativa (%) de la estación meteorológica de CICESE para el período 2009-2014. Las áreas sombreadas indican la presencia de VSA.

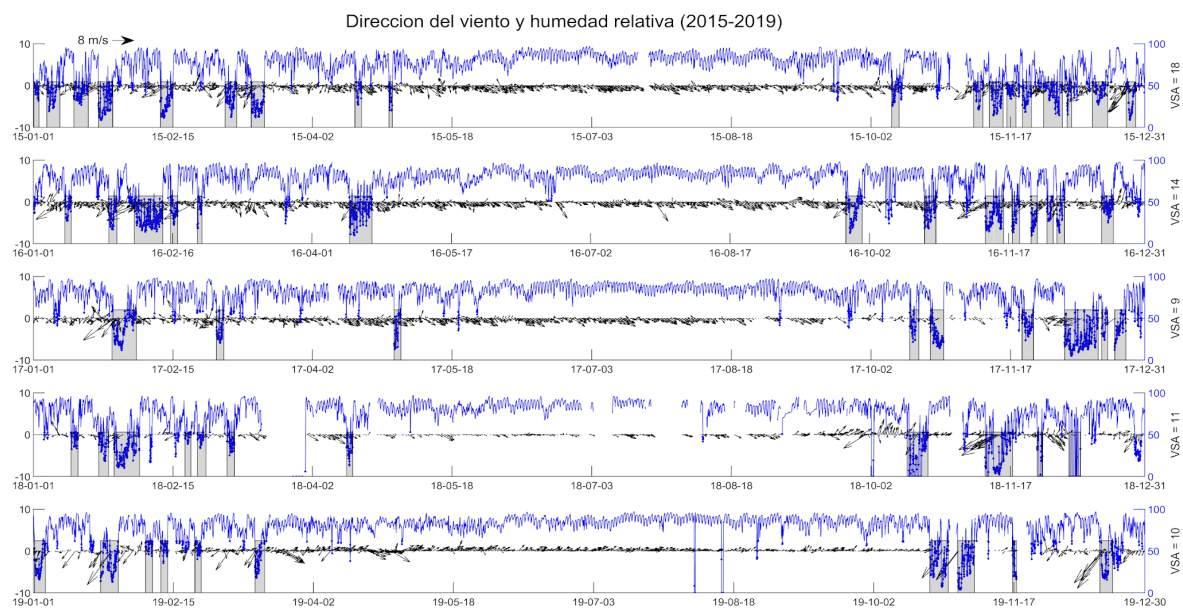


Figura 3. Campo de vientos (vectores) y humedad relativa (%) de la estación meteorológica de CICESE para el período 2015-2019. Las áreas sombreadas indican la presencia de VSA.

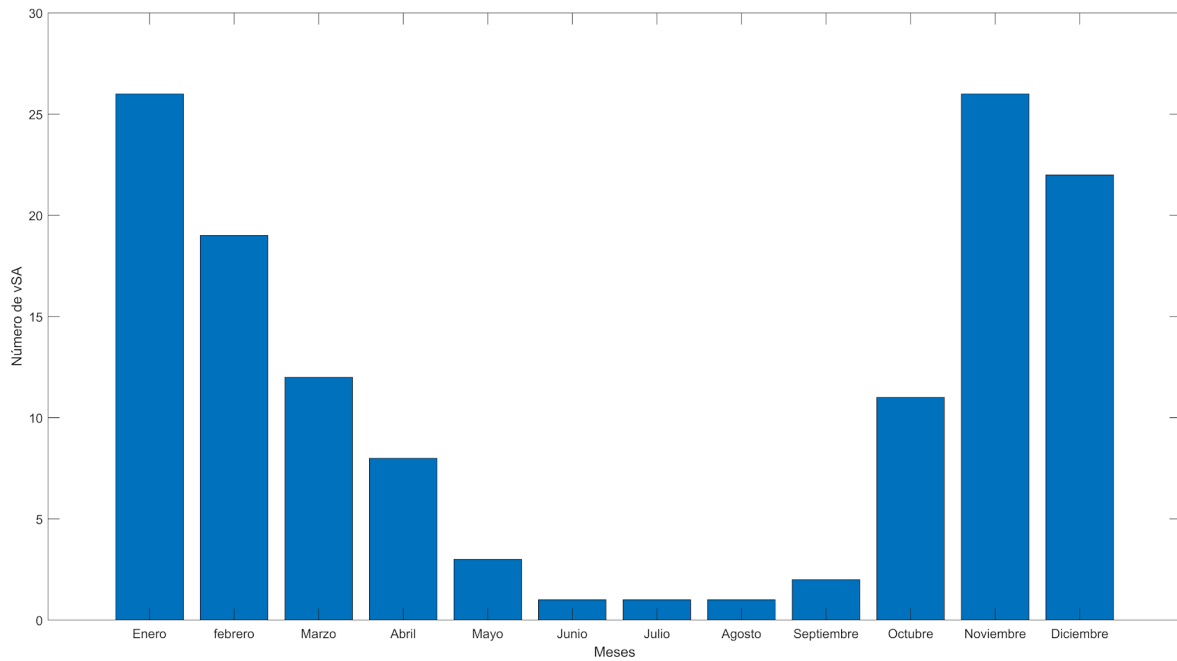


Figura 4. Histograma del número de eventos de VSA registrados mensualmente para el período del 2009 al 2019.

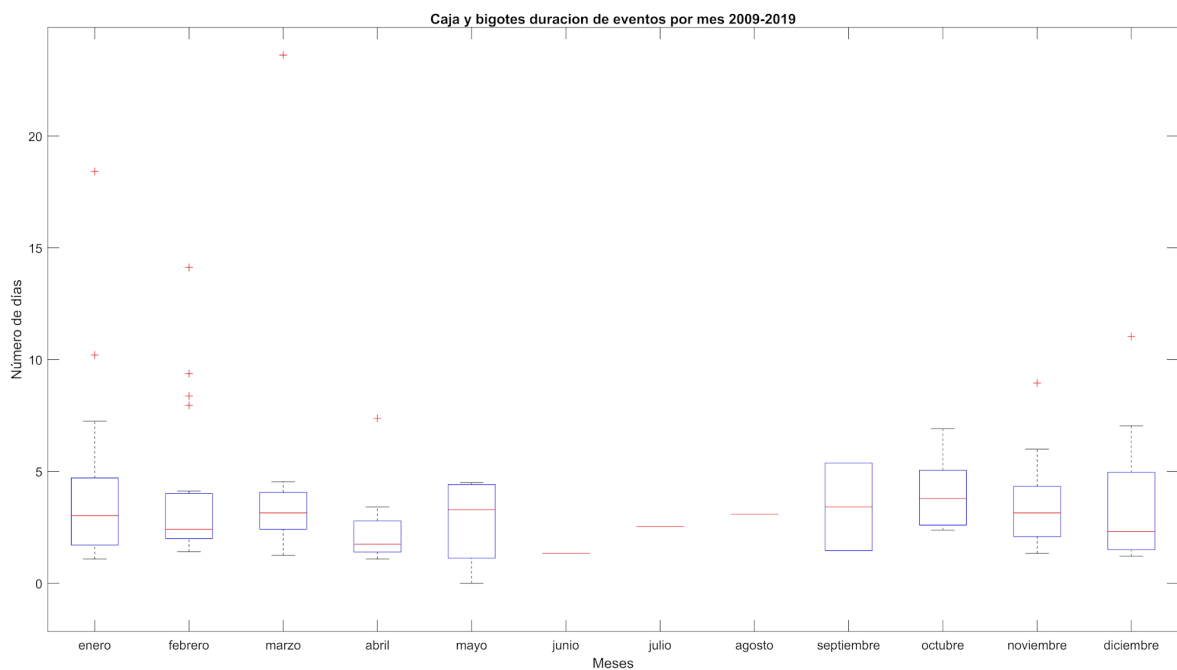


Figura 5. Duración de los eventos de VSA registrados mensualmente durante el período 2009-2019. Las gráficas de cajas y bigotes muestran los valores medios con la línea roja. Las cruces rojas indican valores atípicos.

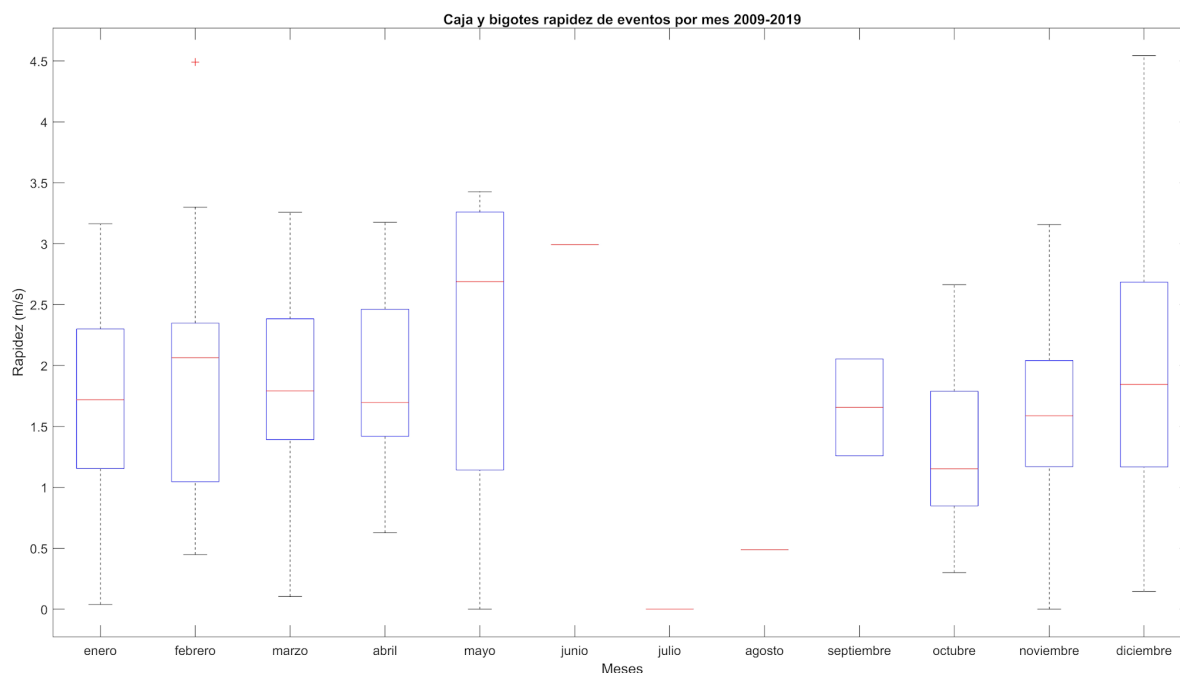


Figura 6. Rapidez promedio horaria de los eventos de VSA registrados mensualmente durante el período 2009-2019. Las gráficas de cajas y bigotes muestran los valores medios con la línea roja. Las cruces rojas indican valores atípicos.

5.2. Comparación de trayectorias: derivadores superficiales y partículas sintéticas

La comparación de trayectorias se realizó para el periodo del 29 al 30 de junio del 2012, durante un período donde la disponibilidad de datos de radares es apropiada para tales comparaciones. Cabe destacar que durante dicho período no se presentaron eventos de VSA.

Para comparar las trayectorias de los derivadores (reales y sintéticos) se advectaron 15 partículas sintéticas. Cada partícula describió una trayectoria independiente asociado a la contribución de la caminata aleatoria, una componente del modelo de advección-difusión usado en este trabajo (ecuación 2). A partir de las 15 trayectorias se obtuvo la trayectoria promedio, misma que fue comparada con la trayectoria real del derivador (Fig. 7).

Los resultados mostraron que las trayectorias divergen rápidamente en función del tiempo. En la figura 7a se muestra que las trayectorias muestran un patrón similar de dispersión, en su recorrido viran en el sentido de las manecillas del reloj. En contraste, en la figura 7b, las trayectorias son completamente distintas, la trayectoria media indica un desplazamiento hacia el este, mientras que la

trayectoria 'real' describe un desplazamiento que rota en el sentido de las manecillas del reloj. Resulta importante resaltar que existe una alta variabilidad en los campos de velocidad, como lo muestran las elipses de variabilidad, cuya magnitud es mayor al campo medio de la mayor parte de la bahía. Además, es importante puntualizar que los derivadores reales son advectados por el campo de velocidades totales, que incluye una amplia escala de movimiento, mientras que, las partículas sintéticas son advectadas por campos de velocidades superficiales de radares cuya resolución espacial y temporal son de ~ 1 km y 3 h, respectivamente, características que podrían impactar en las trayectorias descritas anteriormente, factores que se discuten en la sección 6.2.

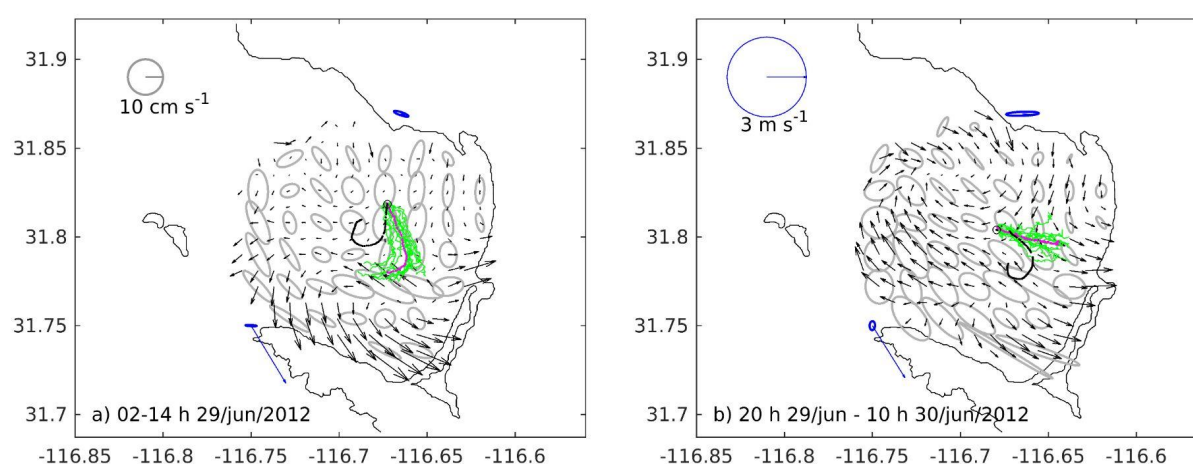


Figura 7. Trayectorias de los derivadores superficiales (tipo Microstar, líneas negras) y de derivadores sintéticos promedio (líneas rojas) obtenidas de 15 trayectorias (líneas verdes), se muestran para un período de ~ 12 h. Los campos de velocidades superficiales y elipses de variabilidad se muestran para el período correspondiente. Los vectores de referencia del campo de velocidades (viento) se muestran en el panel izquierdo (derecho).

5.3. Patrones de circulación superficial bajo condiciones de vientos Santa Ana

A partir de la serie de tiempo del campo de viento de la estación meteorológica del CICESE y de la cobertura del campo de velocidades superficiales se eligieron algunos escenarios con presencia de eventos de vientos Santa Ana para describir patrones de circulación superficial asociado a tales eventos.

Para describir los patrones de dispersión se liberaron 20 derivadores (partículas) sintéticos en seis puntos, cuatro de ellos se localizaron en la región central de la

bahía (zona de mayor cobertura espacial y temporal de datos de radares) y dos en la región cercana a la Isla Todos Santos (Fig. 8a). El período de seguimiento de las partículas fue de 12 h. Los resultados de dispersión que a continuación se presentan, únicamente se muestra la trayectoria promedio de los 20 derivadores y las elipses de dispersión se muestran para cuatro y 12 horas, como se ilustra en la figura 8b. Cabe señalar que las elipses sólo se muestran si el número de partículas, para el tiempo correspondiente, es ≥ 10 partículas, esto asociado a la disponibilidad de datos de velocidad superficial.

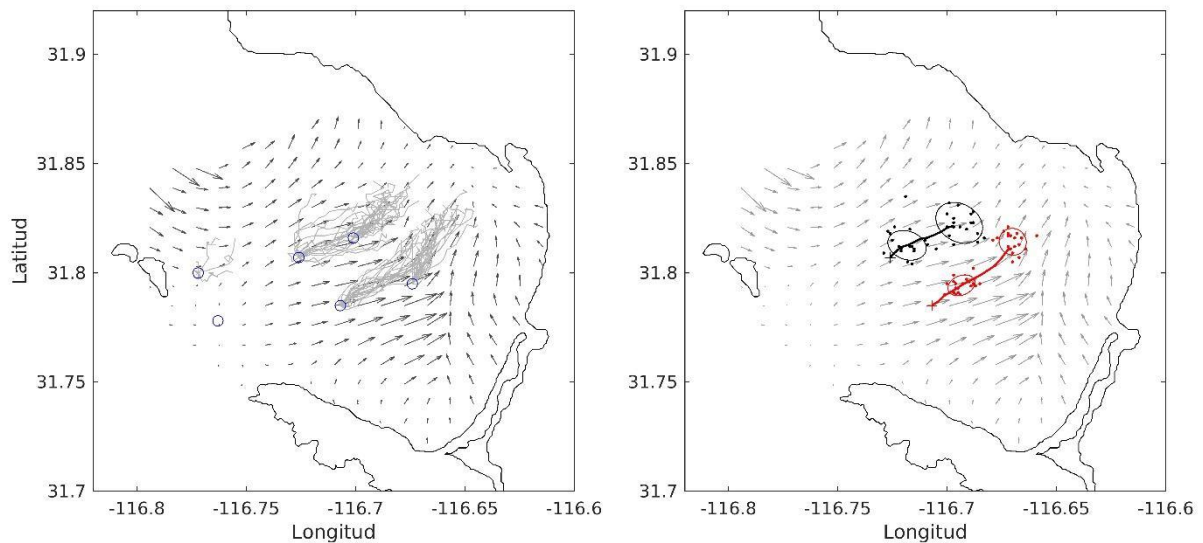


Figura 8. Experimentos de dispersión Lagrangiana. Liberación de 20 derivadores sintéticos en seis fuentes puntuales (círculos azules), cuatro en la región central y dos en la proximidad de la isla de Todos Santos (panel izquierdo). Trayectorias promedio del conjunto de derivadores liberados en dos fuentes puntuales y las elipses de variabilidad para dos tiempos: 4 y 12 h.

El evento VSA registrado durante los días 30/04 a 01/05 de 2014, cuya intensidad media fue de $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$, como lo muestra el vector promedio del viento de la estación meteorológica del CICESE (Fig. 9a). En estas condiciones, el flujo predominante (la magnitud media es mayor a las elipses de variabilidad) es hacia el exterior de la bahía, particularmente en el sector sur de la bahía. Un patrón de circulación superficial similar se observó durante el período del 13-14/05 de 2014, el flujo fue más intenso y dominó toda la superficie de la bahía (Fig. 9b). En contraste, cuando el evento de VSA fue de menor magnitud, se presentó un flujo de entrada en la boca suroeste de la bahía y flujo de salida en la boca noroeste,

mientras que en el interior de la bahía el flujo fue poco estructurado (Fig. 9c).

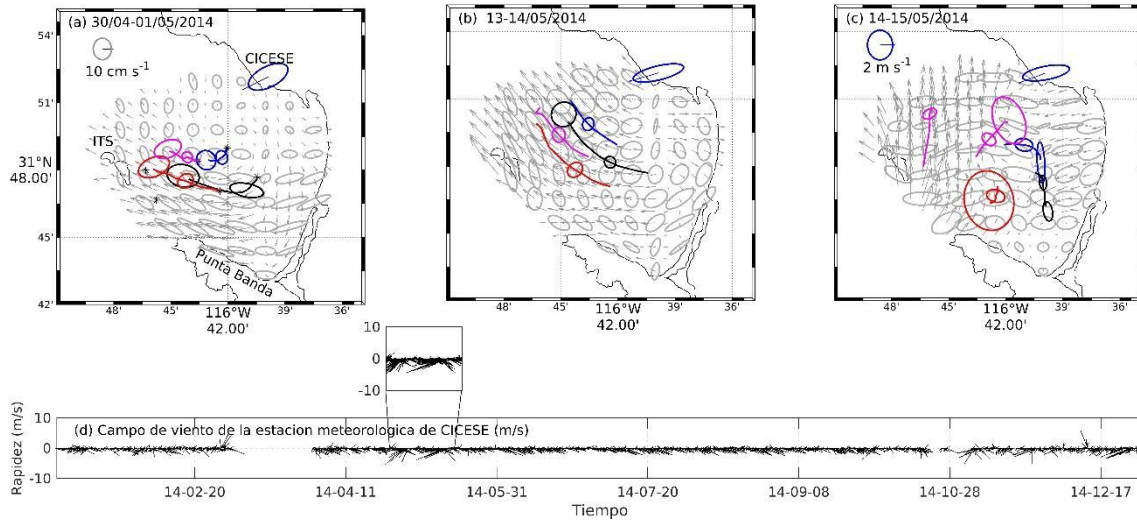


Figura 9. Patrones de dispersión Lagrangiana en condiciones de vientos Santa Ana para los períodos indicados en las figuras. El recuadro de los campos de viento muestra campos horarios del viento alrededor de los períodos de las figuras a y b.

Los patrones de dispersión en los primeros dos períodos descritos arriba (Figs. 9a-b), mostraron un transporte de partículas hacia fuera de la bahía, consistente con los patrones de circulación promedio. Además, los conjuntos de partículas se mantuvieron cerca de su centro de masa, como se puede observar en las elipses de variabilidad. Por inspección visual se puede notar que algunas trayectorias tienen una longitud de aproximadamente la mitad de la longitud de la bahía (Fig. 9b), lo que podría suponer que bajo condiciones de VSA similares, las partículas de la región central de la bahía podrían ser exportadas fuera de la bahía en un período de ~ 24 h. Para el tercer período descrito, la dispersión no mostró un patrón definido en el interior de la bahía, posiblemente asociado a la alta variabilidad del campo de velocidades, en cambio, en la región de la isla Todos Santos, un conjunto de derivadores fue advectada por el flujo predominante hacia el norte por un período de 4 h (Fig. 9c).

Para dos escenarios con vientos Santa Ana débiles ($< 2 \text{ m s}^{-1}$), los patrones de circulación promedio son similares a los descritos anteriormente, los flujos fueron hacia fuera de la bahía, por la boca suroeste (Fig. 10a) y además por la región sur de la boca noroeste (Fig. 10b). En general, los patrones de dispersión muestran

advección de partículas hacia fuera de la bahía, y la separación de las partículas con respecto a su centro de masa es mayor comparado con los escenarios de vientos más intensos, por ejemplo, comparar las trayectorias y elipses de las figuras 10a y 9a-b.

Para un escenario de condiciones de vientos del noroeste débiles, la circulación predominante entra en la boca noroeste y sale en la boca suroeste, mientras que la circulación media en el interior de la bahía es débil con alta variabilidad como los muestran las elipses de variabilidad (Fig. 10 c).

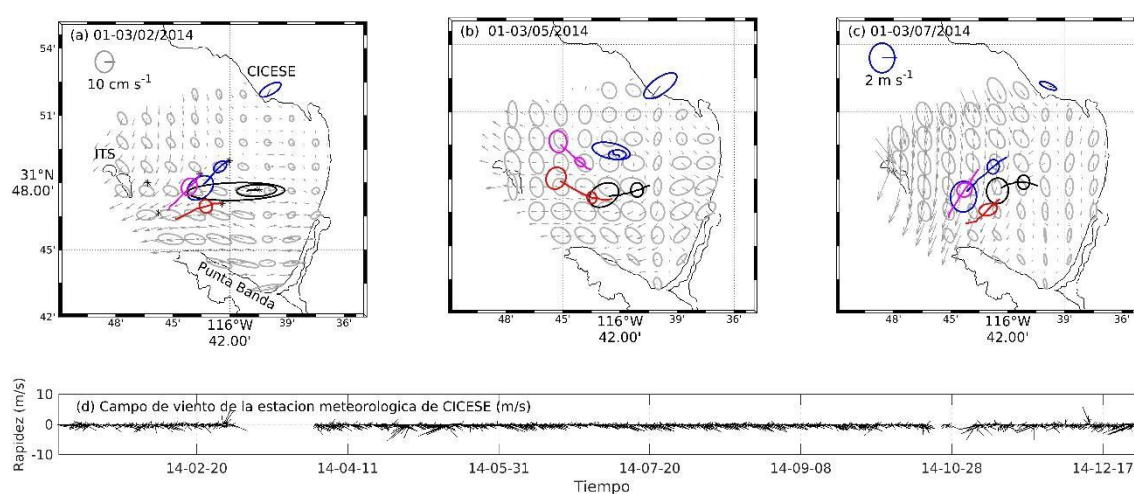


Figura 10. Patrones de dispersión Lagrangiana en condiciones de vientos Santa Ana para los períodos indicados en las figuras.

6. Discusiones

A continuación, se discuten los resultados de la investigación con trabajos publicados sobre los eventos de VSA, trayectorias de derivadores reales y sintéticos, así como el efecto de los VSA sobre la circulación Lagrangiana de la BTS.

6.1. Vientos Santa Ana

La detección de eventos de VSA se basó en la humedad relativa. Para este trabajo se usaron dos bases de datos de la humedad relativa: AgERA5 y datos de la estación meteorológica del CICESE. Al comparar la humedad relativa de ambas fuentes para el período de 2012 se observó que los valores obtenidos de la fuente AgERA5 no mostró patrones consistentes con las observaciones (estación

meteorológica), por ejemplo, la característica típica de la presencia de eventos de vientos Santa Ana; un rápido descenso de la humedad relativa, por estas razones se descartó usar la base de datos de AgERA5.

La identificación de los eventos de vSA usando un método de detección basado en la humedad relativa (ecuación 1), se identificaron 133 eventos de VSA. La humedad relativa ha sido usada como criterio para definir un evento de VSA en la literatura (Westerling *et al.*, 2004), pero además se considera el patrón de viento, que es perpendicular a la costa con dirección hacia el océano (Álvarez, 2017). Sin embargo, Bajo condiciones de vientos Santa Ana, la dirección del viento no necesariamente proviene del sector E-NE, asociado a los efectos orográficos de la región e intensidad de los eventos (Álvarez, 2017; Navarro-Olache *et al.*, 2021), lo que sugiere que la orografía de la península desempeña un papel crucial en la dirección de los vientos que alcanzan las costas del Pacífico de Baja California. Dicha influencia orográfica fue destacada previamente por Castro y colaboradores (2003).

A fin de comparar los diversos criterios de identificación de eventos Santa Ana se aplicaron diferentes metodologías a la serie de viento y humedad relativa para el período de 2012 (Figura 11).

Los resultados indican que, al considerar la variable de humedad relativa menor al 55%, se encontraron 16 eventos de VSA (Fig. 11a). Por otro lado, si consideramos además la dirección del viento (E-NE) con duración de al menos 12 h en condiciones de humedad relativa <55%, se capturaron 10 eventos de VSA. Finalmente, si aplicamos tres criterios: incluir la dirección del viento, la humedad relativa y una rapidez de 3 m/s (Fig. 11c), se identificaron sólo 2 eventos de VSA.

Al comparar estos resultados con la literatura (Rolinski *et al.*, 2019; Navarro-Olache *et al.* 2021), se observa que la dirección e intensidad son importantes para identificar los VSA en diversos puntos a lo largo de Baja California, sin embargo, en la BTS, no lo es tanto, teniendo mucha más relevancia la humedad relativa, esto es de suma importancia para saber cómo identificar los VSA en las diferentes áreas para un futuro estudio.

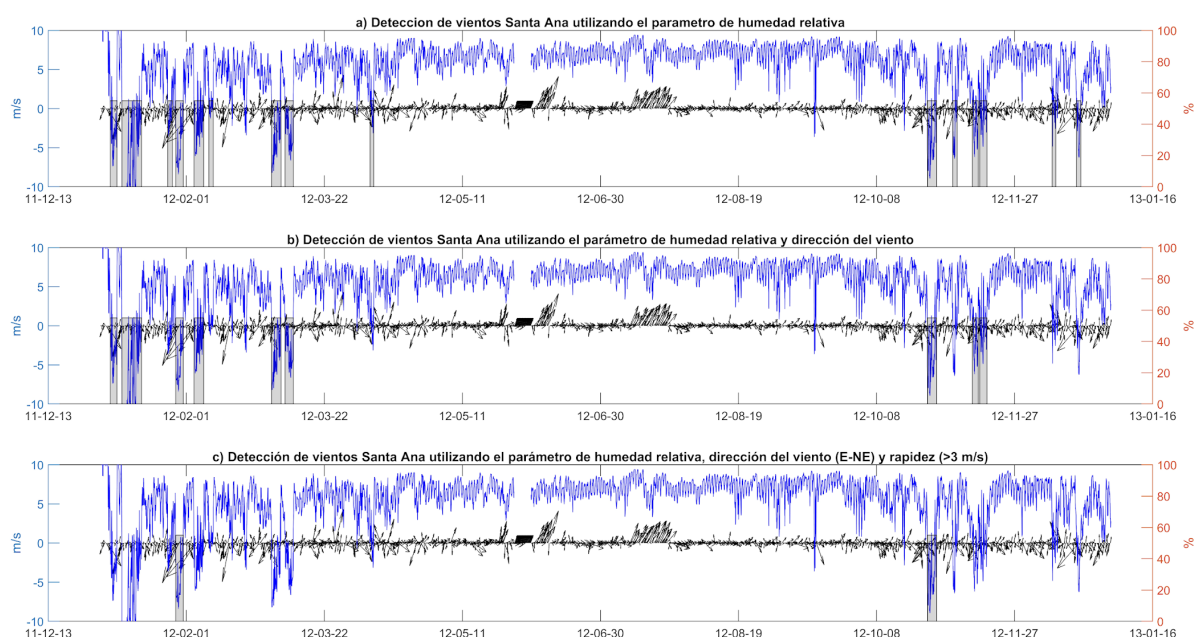


Figura 11. a) Detección de vientos Santa Ana utilizando el parametro de humedad relativa (%), b) Detección de vientos Santa Ana utilizando el parametro de humedad relativa (%) y dirección del viento (NE-E), c) Detección de vientos Santa Ana utilizando el parametro de humedad relativa (%), dirección del viento (NE-E) y rapidez del viento ($>3 \text{ m s}^{-1}$) de la estación meteorológica de CICESE.

Las estadísticas de VSA son escasas para la región de BTS. Recientemente, Navarro-Olache y colaboradores (2021), identificaron 122 eventos de VSA entre 2009 y 2015 usando la misma base de datos meteorológicos, mientras que, en esta investigación se identificaron 88 eventos para el mismo período. La discrepancia debe estar asociada al criterio de identificación de VSA. Olache y colaboradores (2021) definieron un evento de VSA como aquella condición donde la rapidez del viento es $>7 \text{ m s}^{-1}$, y con una humedad relativa $<45 \%$, mientras que en este trabajo no se tomó en cuenta la magnitud del viento y la humedad relativa se definió como el promedio del año menos la desviación estándar del mismo año, además de una escasez en la base de datos para ciertos años

Los eventos de VSA registrados desde 2009 al 2019 representaron alrededor del 5.2 % en las velocidades $> 7 \text{ m/s}$, en comparación con el estudio previo mencionado, que sólo reportó un 23% con estas características. Este resultado implica que los eventos de mayor intensidad fueron menos comunes en nuestra recopilación de datos.

La presencia de los VSA en los meses de invierno y escasos en verano se debe al centro de alta presión que migra hacia la Gran Cuenca (Great Basin) durante los meses de invierno mientras que durante los meses de verano migra hacia el Océano Pacífico, provocando ausencia de los VSA como propone (Castro *et al.*, 2002), esto se corrobora con los datos que se obtuvieron en este trabajo (véase en la figura 6).

6.2. Derivadores superficiales vs. partículas sintéticas

Los derivadores superficiales (tipo Microstar) son cuerpos de deriva que tienen una estructura flotante y un anclaje (~ 1 m) diseñado para que su deriva sea debida principalmente a las corrientes superficiales integradas desde la superficie a ~ 1 m (Bellomo *et al.*, 2015; Van der Mheen *et al.*, 2020). La dinámica superficial del océano es muy compleja debido a los procesos de amplia variedad de escalas espacio-temporales que interactúan en ella (Zavala Sanzón, 2015, Van der Mheen *et al.*, 2020), las corrientes que mueven a los derivadores se les denomina corrientes totales, asociado a la amplia escala de movimiento inmersos en la capa superficial del océano.

En este trabajo, se compararon trayectorias de un derivador superficial y trayectoria media de un conjunto de 15 derivadores sintéticos para un período de ~ 12 h, tiempo que resultó razonable para los experimentos debido a las limitaciones de la cobertura espacial y temporal de los campos de corrientes de radares. Los resultados mostraron que las trayectorias divergen en función del tiempo, patrón que es similar con otros trabajos realizados en bahías (Bellomo *et al.*, 2015; van der Mheen *et al.*, 2020). La divergencia de las trayectorias fue cuantificada como la distancia de separación entre ellas. Los resultados indicaron que la separación fue del orden de 5 km en un período de 12 h, resultado consistente con algunos trabajos (REF). Existen métodos que parametrizan algunos procesos de la dinámica superficial y minimiza las diferencias de las trayectorias de derivadores reales y sintéticos (Bellomo *et al.*, 2015; Meyejürgens *et al.*, 2019; van der Mheen *et al.*, 2020).

Recientemente, van der Mheen y colaboradores (2020) implementaron un método de corrección al modelo de advección-difusión, esto es, además de adveccionar partículas con los campos de velocidades superficiales obtenidos con radares de

alta frecuencia, estos autores incluyeron las corrientes inducidas por el viento, que considera un perfil vertical de velocidad, y la deriva de Stokes. Los resultados mostraron mejoras en el patrón de dispersión de derivadores sintéticos al compararlos con derivadores reales.

Esta investigación sienta un precedente de análisis de dispersión usando datos de derivadores reales y sintéticos, además proporciona una base para mejorar los esquemas de advección para futuros trabajos, por ejemplo, incluir los factores de corrección mencionados arriba.

6.3. Efecto de vientos Santa Ana en el patrón de dispersión de partículas

El efecto de los vientos Santa Ana sobre la circulación superficial de la Bahía de Todos Santos ha sido poco documentado (Argote-Espinoza et al., 1991; Navarro-Olache et al., 2021). Olache y colaboradores mostraron que los vientos inducen flujos superficiales hacia fuera de la bahía, además suponen que los vientos Santa Ana puede representar un mecanismo efectivo de recambio de agua de la bahía.

En esta investigación se analizó los patrones de dispersión asociados a condiciones de vientos Santa Ana, mediante la liberación de partículas Lagrangianas en fuentes puntuales. Bajo condiciones de eventos de vientos Santa Ana los patrones de dispersión de partículas indicaron transporte predominantemente hacia el oeste, hacia fuera de la bahía. Asociado a la longitud de algunas trayectorias y a las dimensiones de la bahía, se puede suponer que un conjunto de partículas de la zona central de la bahía podría ser advectada hacia el exterior de la bahía en un período menor a 24 h, hecho que apoya la hipótesis de algunos trabajos que proponen la influencia de los vientos Santa Ana como un mecanismo de recambio de agua de la bahía (Navarro-Olache et al., 2021).

Si consideramos que los eventos de vientos Santa Ana transportan agua hacia fuera de la bahía, por conservación de masa, debe existir un flujo que compense dicho transporte. En condiciones de vientos Santa Ana, algunos patrones de circulación muestran divergencia zonal del flujo (véase figuras 10b y 11a-b). Tal divergencia está alineada meridionalmente con la posición de la estación meteorológica de CICESE. La influencia de los vientos Santa Ana en la vertical podría ser enfocada desde el punto de vista de modelos numéricos para evaluar el papel que juegan los vientos Santa Ana en la columna de agua.

7. Conclusiones

El presente estudio se enfocó fundamentalmente en investigar el efecto de los vientos Santa Ana sobre la dispersión de partículas dentro de la Bahía Todos Santos. La dispersión es un aspecto relevante para entender el transporte de trazadores en la bahía.

La detección de eventos de viento Santa Ana basado en la humedad relativa, resultó ser un parámetro apropiado para identificar eventos donde la humedad relativa desciende de forma abrupta, una característica de estos vientos. Sin embargo, estas condiciones no necesariamente están asociadas a vientos del sector E-NE.

Las trayectorias de los derivadores reales y sintéticos divergen rápidamente en función del tiempo. Para mejorar las predicciones de trayectorias sintéticas es necesario introducir algunas correcciones al modelo de advección-difusión, parametrizaciones de corrientes por viento y deriva de Stokes.

El efecto de los vientos Santa Ana sobre la dispersión de partículas consistió en un transporte principal hacia el oeste, consistente con el campo medio de los corrientes.

8. Referencias

- Álvarez, C. A., Carbajal, N., & Pineda-Martínez, L. F. (2022). Dust pollution caused by an extreme Santa Ana wind event. *Natural Hazards*, 110(3), 1427-1442.
- Álvarez, C. (2017). Vientos de Santa Ana y tormentas de polvo en el noroeste de México. *Master's Thesis in Sciences, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí, Mexico*.
- Boogaard, H., Schubert, J., De Wit, A., Lazebnik, J., Hutjes, R., & Van der Grijn, G. (2020). Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.6c68c9bb.
- Brickman, D., Ådlandsvik, B., Thygesen, U., Parada, C., Rose, K., Hermann, A., & Edwards, K. (2009). Particle tracking. In E. North, A. Gallego, & P. Petitgas (Eds.), *Manual of Recommended Practices for Modelling Physical-biological Interactions in Fish Early-life History* (Vol. 295, pp. 14-31). ICES Cooperative Research Report.
- Castro, R., Parés-Sierra, A., & Marinone, S. G. (2003). Evolución y

- extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la península de Baja California. *Ciencias marinas*, 29(3), 275-281. Castro Valdez, R., Durazo Arvizu, R., Flores-Vidal, X., Hernández-Walls, R., Navarro-Olache, L. F., Martínez-Alcalá, A., & Aime-Tanahara, S. (2006). Observaciones de corrientes lagrangeanas en la bahía de todos santos baja california, méxico. Informe técnico.
- Cervantes-Audelo I. (2014). Análisis de circulación y dispersión en la Bahía de Todos Santos, Baja California. MSc thesis. Universidad del Mar, Oaxaca, México, 61 pp.
- Flores-Vidal, X., Durazo, R., Castro, R., Navarro, L. F., Dominguez, F., & Gil, E. (2015). Fine-Scale Tidal and Subtidal Variability of an Upwelling-Influenced Bay as Measured by the Mexican High Frequency Radar Observing System. *Coastal Ocean Observing Systems*, 209– 228. doi:10.1016/b978-0-12-802022-7.00012-2
- LaCasce, J. H. (2008). Lagrangian Statistics from Oceanic and Atmospheric Observations. In J. B. Weiss & A. Provenzale (Eds.), *Transport and Mixing in Geophysical Flows: Creators of Modern Physics* (pp. 165–218). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75215-8_8.
- Lumpkin, R., & Flament, P. (2001). Lagrangian statistics in the central North Pacific. *Journal of marine systems*, 29(1-4), 141-155.
- Mateos, E., Marinone, S. G., & Lavín, M. F. (2013). Numerical modeling of the coastal circulation off northern Baja California and southern California. *Continental shelf research*, 58, 50-66.
- Navarro-Olache, Luis-Felipe, Castro, R., Durazo, R., Hernández-Walls, R., Mejía-Trejo, A., Flores-Vidal, X., & Flores-Morales, A. L. (2021). Influence of Santa Ana winds on the surface circulation of Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Atmósfera*, 34(1), 97-109. Epub 10 de febrero de 2021. <https://doi.org/10.20937/atm.52719>
- Paris, C. B., Helgers, J., Van Sebille, E., & Srinivasan, A. (2013). Connectivity Modeling System: A probabilistic modeling tool for the multi-scale tracking of biotic and abiotic variability in the ocean. *Environmental Modelling & Software*, 42, 47-54.
- Poulain, P. & P.P. Niiler, (1989): Statistical Analysis of the Surface Circulation in the California Current System Using Satellite-Tracked Drifters. *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 1588–1603
- Pérez-Brunius P, Calva Chávez M., A. (2013). Factores que determinan la variabilidad estacional de la estratificación en la Bahía de Todos Santos, B. C. Resumen en reunión de la Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jalisco.
- Rypina, I. I., Kirincich, A., Lentz, S., & Sundermeyer, M. (2016). Investigating the eddy diffusivity concept in the coastal ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 46(7), 2201-2218.
- Rolinski, T., Capps, S. B., & Zhuang, W. (2019). Santa Ana winds: A descriptive climatology. *Weather and Forecasting*, 34(2), 257-275.
- Van der Mheen, M., Pattiaratchi, C., Cosoli, S., & Wandres, M. (2020). Depth-dependent correction for wind-driven drift current in

- particle tracking applications. *Frontiers in Marine Science*, 7, 305.
- Westerling, A. L., Cayan, D. R., Brown, T. J., Hall, B. L., & Riddle, L. G. (2004). Climate, Santa Ana winds and autumn wildfires in southern California. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(31), 289-296.
- Zavala-Sansón, L. (2015). Surface dispersion in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 137, 24-37.
- Zavala-Sansón, L., Perez-Brunius, P., & Sheinbaum, J. (2017). Point source dispersion of surface drifters in the southern Gulf of Mexico. *Environmental Research Letters*, 12(2), 024006.
- Zavala-Sansón, L., Sheinbaum, J., & Pérez-Brunius, P. (2018). Single-particle statistics in the southern Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. 57-2, 139-150.