

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.). La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos Autor.

CICESE © 2022, Todos los Derechos Reservados, CICESE

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Dispersión de derivadores superficiales en el Norte
del Océano Pacífico: una aproximación a la isla de
basura**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestra en Ciencias

Presenta:

María Fernanda González Amador

Ensenada, Baja California, México

2022

Tesis defendida por

María Fernanda González Amador

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Luis Zavala Sansón
Director de tesis

Dr. José Pedro Osuna Cañedo

Dr. Helmut Maske Rubach



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Copyright © 2022, Todos los Derechos Reservados, CICESE

Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización por escrito del CICESE

Resumen de la tesis que presenta María Fernanda González Amador como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Oceanografía Física.

Dispersión de derivadores superficiales en el Norte del Océano Pacífico: una aproximación a la isla de basura

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Zavala Sansón
Director de tesis

La basura flotante, conformada principalmente por plásticos, es transportada a escala global por corrientes, viento y olas. El destino final de estos desechos superficiales se concentra en cinco islas de basura ubicadas en los grandes giros subtropicales. La isla de basura flotante del Océano Pacífico Norte (OPN) es la de mayor tamaño. Esta investigación describe la dispersión estadística de descargas sintéticas superficiales que parten desde diferentes localidades del continente americano y cuantifica su aportación a la isla de basura del OPN. La evolución de las descargas se calcula por medio de herramientas estadísticas -matrices de transición y elipses de dispersión- basadas en registros históricos de trayectorias de derivadores superficiales. Destacan los siguientes resultados. (i) Se encontraron las rutas preferenciales de descargas costeras en el continente hacia la isla de basura. (ii) Se cuantificaron las aportaciones relativas de los sitios de descarga y los tiempos de arribo a la isla de basura. Las mayores contribuciones y los menores tiempos de arribo correspondieron a tres localidades al norte del OPN (Seattle, San Francisco y Los Ángeles), respecto a sitios ubicados en el sur (Los Cabos, Acapulco y Salina Cruz). (iii) Se propone una nueva delimitación estadística de la posición, tamaño y orientación de la isla de basura, la cual tiene su centro de masa en $(-145^\circ, 31^\circ)$, un área de $2.59 \times 10^6 \text{ km}^2$ y orientación de 12° respecto al este. (iv) La dinámica y orientación de la isla de basura es influenciada por la evolución del anticiclón atmosférico del OPN, el cual promueve la deriva de Ekman y por lo tanto favorece la retención de desechos, principalmente durante el verano. Este efecto se reduce cuando el anticiclón se debilita en invierno, estación en la que disminuye la acumulación de trazadores. Con base en estos resultados, se recomienda la generación de nuevas matrices de transición separando los registros de derivadores con lastre (afectados principalmente por las corrientes marinas) y sin lastre (afectados por el viento y oleaje) para entender mejor los procesos dispersivos en la superficie.

Palabras clave: Dispersión superficial oceánica, Isla de basura, Océano Pacífico Norte, descargas puntuales

Abstract of the thesis presented by María Fernanda González Amador as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Dispersion of surface drift in the North Pacific Ocean: an approach to the garbage island

Abstract approved by:

Dr. Luis Zavala Sansón
Thesis Director

Marine debris, made up mainly of plastics, is transported on a global scale by currents, wind and waves. The final destination of this surface waste is concentrated in five garbage islands in the subtropical gyres. The largest garbage island is located in the eastern part of the North Pacific Ocean (NPO). This research describes the statistical dispersion of synthetic surface discharges that start from different locations in the American continent and quantifies their contribution to the NPO garbage island. The evolution of the discharged material is calculated through statistical tools -transition matrices and dispersion ellipses- based on historical records of surface drifter trajectories. The following results stand out. (i) The preferential routes of coastal discharges towards the garbage island were found. (ii) We quantified the relative contributions of the discharge sites and the times of arrival at the garbage island. The highest contributions and the shortest arrival times corresponded to three northern locations (Seattle, San Francisco, and Los Angeles) compared to southern sites (Los Cabos, Acapulco, and Salina Cruz). (iii) A new statistical delimitation of the position, size and orientation of the garbage island is proposed, which has its center of mass at $(-145^\circ, 31^\circ)$, an area of $2.59 \times 10^6 \text{ km}^2$, and orientation of 12° with respect to the east. (iv) The dynamics and orientation of the garbage island is influenced by the evolution of the NPO atmospheric anticyclone, which enhances the Ekman drift and hence favours the convergence of debris, mainly during the summer. This effect is reduced when the anticyclone is weakened during the winter, thus decreasing the debris retention. To better understand the dispersive processes on the surface, specifically those related to wind and waves, we recommend the generation of new transition matrices by separating the records of drogued drifters (which mainly follow the ocean currents) and undrogued drifters (mainly affected by the wind).

Keywords: Ocean surface dispersion, Garbage patch, North Pacific Ocean, punctual discharges

Dedicatoria

A Pachita y Don Héctor por apoyarme y creer en mí, desde mi llegada hasta su partida.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada B.C. por permitirme seguir aprendiendo sobre lo que me apasiona: el océano y las fuerzas que lo gobiernan.

Al pueblo de México, a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 1051578

A mi director de tesis, el Dr. Luis Zavala Sansón, por ser un guía paciente y dedicado, quien me brindó la libertad para apropiarme de mi investigación, así como el acompañamiento que me aseguraba ir en la dirección correcta.

A mis sinodales, el Dr. Helmut Maske y el Dr. Pedro Osuna, por su disposición y retroalimentación en este proceso, haciéndome sentir cómoda y alegre de haberlos elegido como comité en todo momento.

A mis catedráticos, por cambiar mi forma de ver el mundo a través de sus enseñanzas. Particularmente, a mis profesoras, por ser esas referentes científicas que no tuve de niña. Además me gustaría reconocer el esfuerzo extra que implicó para todo el departamento de Oceanografía Física la virtualidad durante la pandemia.

A mis compañeros del posgrado: Francisco, Giovanni, Jesús, Brandon y Sebastián, por desatorarme más de una vez en cosas que sola me hubieran tomado bastante tiempo más.

Agradecimientos Personales

A mamá y papá, porque siempre me hacen sentir capaz y apoyada, para llegar hasta aquí y a donde desee.

A mi hermana, por ser mi compañera y alegría cada día.

A mi familia, que en la distancia me cuidan y en sus oraciones me llevan.

A Apa, Anita, Edgar, Ernesto, Laura, Marce, Marleng, Rafa, Viri y Yus, por haber sido un puerto seguro en medio de mis tormentas.

Al círculo de mujeres que leen, por acompañarme estos últimos cuatro años en mi búsqueda personal.

A la vida, por traerme hasta este alegre momento.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xiii
Capítulo 1. Introducción	
1.1. El problema de los plásticos	3
1.2. Dispersión oceánica	4
1.3. Procesos dispersivos en la superficie del océano	5
1.4. Circulación del Océano Pacífico Norte	7
1.5. Antecedentes de la isla de basura del OPN	9
1.6. Enfoque de la tesis	15
1.7. Objetivos	16
1.7.1. Objetivo general	16
1.7.2. Objetivos específicos	16
Capítulo 2. Datos y métodos	
2.1. Derivadores superficiales	17
2.2. Matrices de transición	21
2.3. Elipses de dispersión	24
2.4. Diseño experimental	26
Capítulo 3. Resultados	
3.1. Contribución de descargas instantáneas	30
3.2. Delimitación de la isla de basura	36
3.3. Contribución de descargas continuas	38
3.4. Variación bimestral de la isla	39
Capítulo 4. Discusiones	
4.1. El camino de Norte América a la isla de basura	43
4.2. Seattle: un caso particular	45
4.3. Lo que sabemos de la isla	46
4.4. ¿A dónde va lo que no va a la isla?	48
4.5. Efecto del lastre en derivadores	50
4.6. El problema de los pocos registros	51
4.7. Aspectos pendientes	53

Tabla de contenido (continuación)

Capítulo 5. Conclusiones

Literatura citada 57

Lista de figuras

Figura	Página
1. Concentraciones de plástico modeladas en el océano basadas en mediciones de agosto de 2015 (Lebreton et al., 2018).	1
2. Masa de plástico modelada que fluye de los ríos hacia los océanos en toneladas por año. Las variables por país que se consideran son densidad de población (<i>hab/km²</i>), producción de residuos plásticos mal gestionada (<i>kg/hab día</i>) y escurrimiento promedio mensual (<i>mm/día</i>) (Lebreton et al., 2017).	2
3. Esquema de las principales corrientes y zonas de acumulación en el Pacífico Norte. Las áreas delimitadas por líneas naranjas representan las zonas frontales. Las áreas sombreadas en verde representan las principales regiones oceánicas donde se han reportado desechos marinos acumulados. WGP – isla de basura del oeste (intermitente), EGP – isla de basura del este (Howell et al., 2012).	2
4. Comparación de biomasa (seca) y masa de materiales desarrollados por el humano. Las alturas de las áreas coloreadas representan la masa de la categoría correspondiente acumulada hasta ese año (Elhacham et al., 2020).	3
5. Principales corrientes del Océano Pacífico Norte (Oceánicos, 2021)	8
6. Posiciones finales de partículas advectadas por campos de velocidad de diferentes forzadores después de 5 años (Kubota, 1994).	10
7. Líneas de corriente de (a) corrientes geostróficas medias y (b) corrientes de Ekman. Los colores indican la magnitud de la velocidad y las unidades son <i>cm/s</i> (Maximenko et al., 2012)	11
8. Ubicaciones y fuentes de las 6 islas de basura calculadas por van Sebille. El factor de acumulación del marcador (TAF) en (a) el momento de la liberación, (b) 1 año, (c) 10 años, (d) 50 años, (e) 100 años y (f) 1000 años. Las zonas azules indican áreas donde la variabilidad de la altura de la superficie del mar es mayor de 15 <i>cm</i> , una indicación de alta actividad de remolinos. (Van Sebille et al., 2012)	12
9. Diferencia de la densidad de derivadores del Programa Global de Derivadores de la NOAA entre 1979 y 2015, calculada en cada bin de $1^\circ \times 1^\circ$ y normalizada en el rango $[-1, 1]$. La fila superior (inferior) corresponde a la diferencia de densidades después de al menos 1 (1.5) años. La columna izquierda (derecha) corresponde a derivadores con lastre (sin lastre) (Beron-Vera et al., 2016)	13
10. Densidad de partículas por bin ($2^\circ \times 2^\circ$) después de: 6 meses (A,B), 2 años (C,D), 6 años (E,F) y 12 años (G,H), obtenidas en el estudio numérico de Bosi et al. (2021) para el Atlántico Norte. Los colores representan la densidad relativa respecto a las partículas sembradas. El cuadro de texto indica la cantidad de partículas restantes, y la escala de colores es logarítmica.	14

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
11. Esquema de forzadores implicados en la deriva de boyas superficiales. Los lastres se ubican a 15 m de profundidad y cerca de la mitad (52 %) lo pierde durante su recorrido.	17
12. Número de datos por bin ($1^\circ \times 1^\circ$) de las boyas del Programa Global de Derivadores de la NOAA (EEUU). Los bins en blanco tienen menos de 100 datos.	18
13. Posiciones iniciales, finales y trayectorias de 9230 derivadores lanzados entre los años 1979 y 2020 en el Programa Global de Derivadores.	19
14. Campo de velocidad euleriano [m/s] calculado a partir de las velocidades promedio de los derivadores superficiales en cada bin. Las superficies representan la magnitud de la velocidad. La velocidad máxima es 1.52 m/s. Solo se presentan vectores cada 3 grados.	20
15. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) de las componentes de velocidad de las boyas (estrellas) para (a) registros zonales y (b) meridionales. Las líneas continuas indican la distribución normal. Las PDF corregidas para ambas direcciones se muestran en los paneles (c) y (d).	21
16. Esquema de para entender como funciona una matriz de transición. Los cuadros de arriba representan seis bins con cierto número de partículas al tiempo inicial (izquierda) y al tiempo t (derecha). Los rectángulos inferiores constituyen la matriz de transición de 6×6 que contiene las probabilidades de pasar de un bin al tiempo t_0 a otro bien al tiempo $T = t - t_0$ (ver texto para mayores detalles).	23
17. Características de una elipse de dispersión.	25
18. Ubicaciones de los siete sitios de descarga	27
19. Subdominio en la parte este del OPN sobre el cual se calculan las elipses de dispersión que rastrean a la isla de basura: longitudes de -240° a -90° y latitudes de 0° a 60° (líneas azul claro). La elipse representa la dispersión en los primeros dos meses después de una descarga puntual desde Acapulco.	29
20. Evolución de la concentración de una carga puntual liberada en San Francisco (punto magenta) a cuatro tiempos diferentes hasta el tiempo de arribo. La línea blanca indica la trayectoria del centro de masa (cada punto blanco indica un año). La escala de colores varía en función de las concentraciones máximas del subdominio este para cada tiempo.	30

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
21. Trayectorias de los centros de masa de las descargas instantáneas en diferentes ciudades de América (líneas de colores), dentro del subdominio de la isla de basura (líneas continuas), durante 30 años. Cada punto en las trayectorias indica un año.	31
22. Trayectorias a la isla de basura desde diferentes descargas instantáneas variando su bimestre de descarga.	33
23. Series de tiempo del desplazamiento del centro de masa desde los puntos de descarga. Los círculos señalan el tiempo de arribo a la región de la isla de basura.	34
24. Elipses de dispersión de las diferentes descargas instantáneas unitarias separadas por bimestre final del experimento.	34
25. Trayectorias previas (líneas azules) y posteriores (líneas rojas) de los derivadores que atravesaron el centro de masa (punto negro) de la isla de basura promedio (elipse negra), entre los años 1979 y 2020. Las flechas negras indican el campo de velocidad euleriano calculado a partir de las velocidades promedio del conjunto completo de derivadores.	36
26. Concentraciones finales para varios experimentos de una descarga instantánea desde el centro de masa del isla de basura (-145°,31°) dentro del dominio delimitado por las líneas punteadas. Las elipses se calculan con diferente límite mínimo de concentración por bin. De adentro hacia afuera: >0.1 %, >0.05 %, >0.01 %, >0.005 % y 0.001 %, respectivamente.	37
27. Series de tiempo de la concentración absoluta acumulada en la isla de basura después de descargas continuas de diez años desde las diferentes localidades. En el mapa, las concentraciones relativas a partir de una descarga continua desde los Ángeles vertida cada bimestre durante diez años.	39
28. Trayectorias del centro de masa en 30 años calculadas en experimentos estadísticos con matrices de probabilidad constantes por bimestre. Cada punto indica un año. La descarga instantánea es desde el centro de masa de la isla de basura (-145°,31°). La elipse negra es la isla de basura aquí calculada.	40
29. Trayectorias del centro de masa de 30 años para experimentos numéricos con matrices de probabilidad constantes por bimestre, desde el centro de masa de la isla de basura. Los colores de fondo indican la presión a nivel del mar, mientras las flechas representan la dirección del esfuerzo del viento. Al mismo tiempo, se señalan la posición promedio de la isla de basura de cada bimestre (elipse negra) y su centro de masa inicial (cruz roja).	41

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
30. Trayectorias a la isla de basura desde diferentes descargas instantánea desde Norte América para los bimestres de noviembre-diciembre y mayo-junio.	43
31. Corrientes geostróficas promedio calculadas con altimetría satelital (Copernicus, 2021a) para el bimestre de verano (mayo-junio) entre 1993 y 2020. En color negro se muestra la elipse de dispersión calculada en la sección 3.2 que denota la isla de basura para la región este del OPN.	44
32. Corrientes geostróficas calculadas de la misma forma que en la Figura 31 pero para el bimestre de invierno (noviembre-diciembre) entre 1993 y 2020.	45
33. Trayectoria del centro de masa de la isla de basura (línea blanca) para una descarga instantánea desde la ciudad de Seattle (punto magenta) durante 30 años. Cada punto blanco indica un año.	46
34. Distribución vertical anual de partículas en la isla de basura del OPN (Fischer et al., 2022). Panel izquierdo: ubicación de la zona de estudio y distribución vertical de algunas variables físico-biológicas. Paneles derechos: distribución vertical de partículas durante un año.	47
35. Reparto porcentual de la masa de la descarga inicial después de 30 años. Los tonos de las fracciones azules indican las zonas de acumulación dentro del OPN, mientras que la fracción de color blanco representa el porcentaje de la descarga inicial que sale del OPN. El color de los círculos indica la ubicación de la descarga.	48
36. Ampliación del dominio para el experimento de descarga instantánea desde Salina Cruz después de 30 años. En amarillo se ve el dominio original del OPN, en negro se señala el ecuador y en cian discontinuo el subdominio este del OPN.	49
37. Ampliación del dominio para el experimento de descarga instantánea desde Seattle después de 30 años. En amarillo se ve el dominio original del OPN, en negro se señala el ecuador y en cian discontinuo el subdominio este del OPN. El cuadro rojo marca la zona de mayor acumulación.	50
38. Sitios sin datos de la matriz de transición obtenidos de plasticadrift.org	52
39. Comparación de experimentos con elipses sin delimitar una subregión (1) y con una región limitada (2). Cada fila compara los mismos tiempos y sitio de descarga. Las paletas de colores toman como concentración máxima la del OPN completo (1) y la de la subregión (2). Los cuadros rojos indican donde se tienen las mayores concentraciones (fuera de la subregión). Las líneas amarillas punteadas resaltan el límite de interés para cada caso.	53

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Localizaciones de los diferentes sitios geográficos	28
2. Características del destino de las descargas instantáneas	35
3. Efecto del límite de concentración en las elipses de dispersión	38

Capítulo 1. Introducción

La contaminación plástica se ha convertido en uno de los mayores desafíos ambientales desde el siglo pasado y permanecerá como un problema grave sin resolver en el corto plazo (Geyer et al., 2017). A escala global dentro del océano el destino final de estos desechos está en cinco manchas o islas de basura, encontradas dentro de los grandes giros subtropicales (Maximenko et al., 2012). En la superficie, las zonas de convergencia ocupan solo el 8% del espacio, pero acumulan el 92% de todos los microplásticos flotantes (Aliani et al., 2022). La basura llega a dichos sitios de convergencia superficial transportada, directa o indirectamente, por las corrientes, el viento y las olas (Egger et al., 2020). De las islas de basura, la isla del Océano Pacífico Norte (OPN) es la que se estima tiene las mayores concentraciones y superficie (Figura 1).

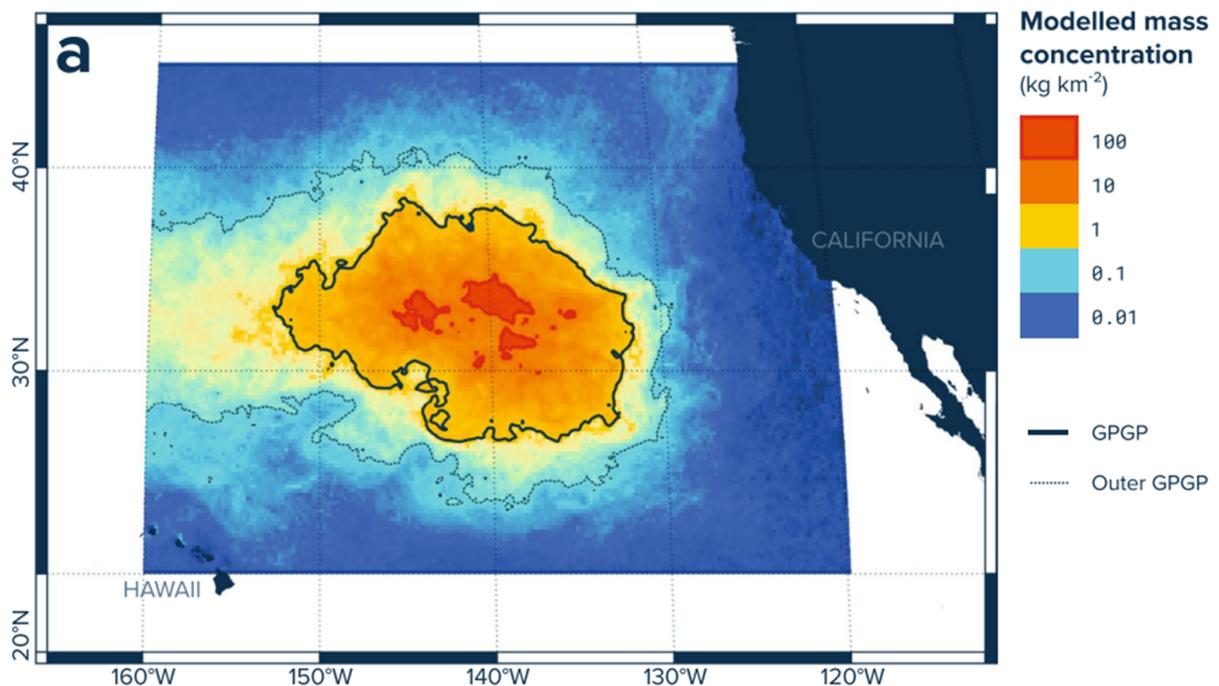


Figura 1. Concentraciones de plástico modeladas en el océano basadas en mediciones de agosto de 2015 (Lebreton et al., 2018).

Conocer los efectos directos de las zonas costeras en las islas de basura es necesario para proponer estrategias eficientes que enfrenten las problemáticas ambientales que son consecuencia de los desechos marinos superficiales (Van Sebille et al., 2020). Lamentablemente, la dinámica de liberación y trayectoria de basura flotante en el océano sigue siendo poco conocida (Egger et al., 2020). Además, los estudios

ambientales actuales solo consideran diferencias en las zonas costeras a partir de su generación de residuos, es decir, el tamaño de sus descargas (Figura 2). Este enfoque pasa por alto la importancia de sus posiciones geográficas. Actualmente, si bien existen otras investigaciones oceanográficas que contribuyen en el tema, estas se enfocan en describir la circulación de la cuenca oceanográfica, sin relacionarla directamente con los sitios de las descargas puntuales (Figura 3). Esta desconexión dificulta la aplicación del conocimiento actual sobre la dinámica dispersiva superficial en la toma de decisiones.

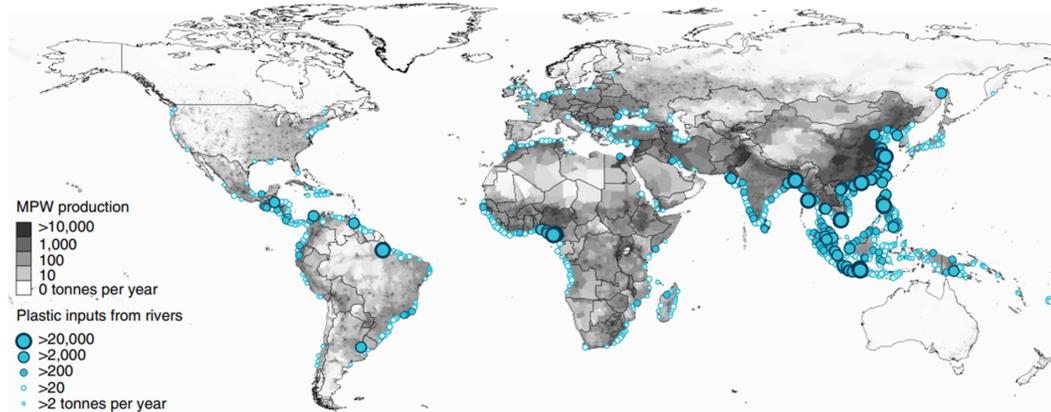


Figura 2. Masa de plástico modelada que fluye de los ríos hacia los océanos en toneladas por año. Las variables por país que se consideran son densidad de población (hab/km^2), producción de residuos plásticos mal gestionada (kg/hab día) y escurrimiento promedio mensual ($mm/día$) (Lebreton et al., 2017).

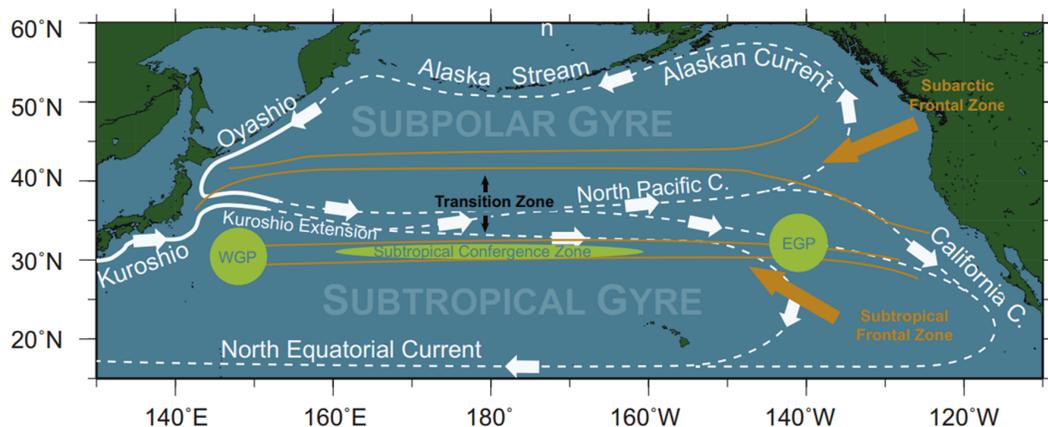


Figura 3. Esquema de las principales corrientes y zonas de acumulación en el Pacífico Norte. Las áreas delimitadas por líneas naranjas representan las zonas frontales. Las áreas sombreadas en verde representan las principales regiones oceánicas donde se han reportado desechos marinos acumulados. WGP – isla de basura del oeste (intermitente), EGP – isla de basura del este (Howell et al., 2012).

En este trabajo describimos el efecto geográfico y bimestral de descargas puntuales de desechos marinos flotantes -instantáneas y continuas- en las características de

la isla de basura del OPN. Para ello, generamos experimentos estadísticos basados en matrices de transición y elipses de dispersión con los que se simula la evolución a largo plazo de descargas costeras en Norteamérica. En lo que resta del Capítulo se contextualiza el problema de los plásticos en el medio marino, se explican los procesos más relevantes que favorecen la dispersión oceánica y se describen algunas investigaciones previas sobre la formación de las islas de basura. Finalmente, se presenta el enfoque general de la tesis y sus objetivos.

1.1. El problema de los plásticos

Se estima que actualmente la cantidad de masa de plástico en el planeta ha superado la biomasa de animales (Figura 4) (Elhacham et al., 2020). Se ha señalado que de 1950 a 2017 la producción diaria de plásticos se incrementó casi 5000 veces, de 1.7 a 8,300 millones de toneladas; poco menos de la mitad de este incremento se dio en solo dos años, de 2015 a 2017. Parte de su sobreproducción se debe a que el 40% del plástico son empaques, es decir, su vida útil dura solo hasta que el siguiente producto sea abierto (Geyer et al., 2017). Como consecuencia, la basura que más encontramos hoy en día, y en todos lados, es plástica.

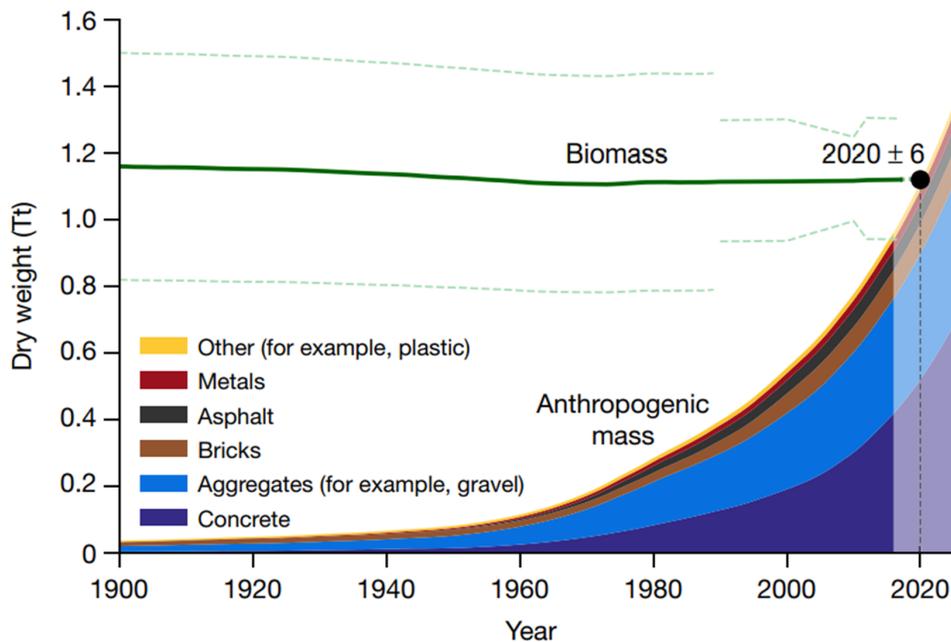


Figura 4. Comparación de biomasa (seca) y masa de materiales desarrollados por el humano. Las alturas de las áreas coloreadas representan la masa de la categoría correspondiente acumulada hasta ese año (Elhacham et al., 2020).

Las fuentes terrestres aportan el 80 % de los desechos plásticos en el medio ambiente marino, principalmente de manera puntual en zonas densamente pobladas o áreas industrializadas (LI et al., 2016). Del plástico que ingresa al mar se estima que el 1 % se encuentra en la superficie, el 66 %-77 % acaba en las playas o en las aguas costeras -hasta 10 km mar adentro- y alrededor del 20 %-30 % de los desechos plásticos de los océanos no se ha contabilizado con precisión, pudiendo estar tanto en la columna de agua como en el fondo marino (Fischer et al., 2022).

Entre los principales impactos documentados del ingreso de desechos plásticos al medio marino se encuentran: la ingestión, el enredo de fauna, la retención superficial de sustancias tóxicas -principalmente, contaminantes orgánicos persistentes- (Rochman, 2020) y el transporte de comunidades no nativas (microbios, algas, peces, etc.) (Engler, 2012). Debido a sus múltiples afectaciones, estos materiales pueden considerarse desechos peligrosos, y su abundancia en el océano proporciona una justificación para tomar medidas que mitiguen su impacto y distribución.

1.2. Dispersión oceánica

Si vertemos una sustancia en el océano y queremos investigar cómo evoluciona en el tiempo, necesitaremos conocer su concentración conforme se dispersa. La concentración de un trazador es la relación de su masa con su volumen o área. Existen dos maneras de rastrear al trazador una vez vertido en el océano: desde el punto de vista euleriano, es decir, con observaciones fijas siempre desde el mismo sitio; o desde el punto de vista lagrangiano, estudiando estadísticamente el movimiento de partículas independientes arrastradas por el fluido. Los trazadores Lagrangianos en el océano pueden ser boyas de deriva (ya sea superficiales o subsuperficiales) o contaminantes sólidos, como los plásticos. En la dispersión oceánica, el fluido puede tener diferentes efectos en el trazador, desde arrastrarlo, advectarlo o difundirlo, o bien, la sustancia dispersada puede afectar, o no, el movimiento del fluido que lo transporta (trazadores activos/pasivos). Otro aspecto relevante es si la identidad básica de los trazadores cambia con el tiempo mientras son advectados. Es importante tener esto en cuenta porque los modelos y las aproximaciones para estudiar su evolución en el tiempo pueden depender de manera crucial en su composición (Zavala Sansón, 2021).

La dispersión oceánica puede estudiarse en una, dos o tres dimensiones. El caso bidimensional se aplica cuando las partículas o sustancias se mueven horizontalmente, es decir, a una profundidad constante, o bien, sobre superficies de igual densidad. En los flujos oceánicos de meso y gran escala, que van desde algunas decenas de km hasta escalas regionales y planetarias, los movimientos horizontales llegan a ser mucho mayores que los verticales. En ellos predomina el balance geostrófico, siendo este el equilibrio entre los gradientes de presión y la aceleración de Coriolis, y el balance hidrostático entre el gradiente vertical de presión y el peso de la columna de agua debido a la gravedad. La dispersión horizontal se puede extender miles de km y es dominada por estructuras (*eddies*) de diversos tamaños, corrientes geostróficas y forzamientos atmosféricos. Por otro lado, La dispersión vertical dependerá considerablemente de la flotabilidad del trazador, es decir, la relación de su densidad respecto a la de su medio.

1.3. Procesos dispersivos en la superficie del océano

Si los desechos vertidos en la superficie libre del océano abierto derivan el tiempo suficiente, lo más probable es que terminen en alguno de los cinco sitios de convergencia superficial dentro de los giros subtropicales. La jerarquía de los diferentes mecanismos que controlan esta deriva se encuentra aún en discusión (cómo se describirá con mayor detalle en la Sección 1.5.). Sin embargo, esta sección se anticipa con una breve descripción de los principales forzadores implicados:

- **Procesos de gran escala:** El flujo horizontal a gran escala es impulsado por los vientos en la superficie, generando la espiral de Ekman bajo la influencia de la rotación de la Tierra (Pedlosky, 1990). El transporte integrado en toda la capa límite superficial tiene regiones de convergencia y divergencia que generan el bombeo de Ekman, que a su vez impulsa el flujo geostrófico a gran escala en el interior del océano. Las áreas de convergencia en escalas de las cuencas oceánicas generan los cinco giros subtropicales, que son sistemas de circulación anticiclónicos definidos por patrones del esfuerzo del viento y límites costeros. En esas regiones, el bombeo de Ekman genera movimientos descendentes desde la superficie a profundidades de unos cientos de metros. Sin embargo, la velocidad vertical hacia

abajo es menor que la velocidad de subida del material flotante, de modo que el plástico tiende a mantenerse en superficie (Eriksen et al., 2014).

- **Procesos mesoescalares:** El océano está poblado de remolinos de diferentes tamaños. Los remolinos de mesoescala son vórtices que giran lentamente, por lo que son afectados por la rotación terrestre. Estos remolinos tienen diámetros de cientos de kilómetros, profundidades de varios cientos de metros y tiempos de vida de semanas a años. Podemos agruparlos en función de su dirección de giro en: (1) remolinos ciclónicos, girando en sentido antihorario en el hemisferio norte y cuya componente radial de la superficie del flujo es principalmente hacia afuera; y el caso contrario (2) remolinos anticiclónicos (Lévy et al., 2018). Debido a que en los remolinos anticiclónicos el flujo superficial es convergente, es en ellos donde se ha visto la acumulación de desechos marinos en su interior. Además de retener materiales pasivos en su interior, los remolinos pueden transportarlos hacia el oeste a lo largo de varios kilómetros durante su tiempo de vida (Howell et al., 2012).
- **Procesos submesoescalares:** Estas estructuras suelen ser filamentosas y se forman cuando una corriente o remolino de mesoescala se vuelve inestable. En la submesoescala, los remolinos son más pequeños y rápidos, por lo que aumentan sistemáticamente la mezcla. Su dinámica se rige por movimientos ageostróficos. La dispersión es mayor en la submesoescala que en la mesoescala (considerando la misma densidad de energía), por lo que estos remolinos, frentes y filamentos tienen importancia local en la deriva, acumulación y dispersión de plásticos, sargazo y derrames de petróleo. Específicamente la acumulación se relaciona con frentes de densidad y vórtices ciclónicos (Lévy et al., 2018).
- **Deriva de Stokes:** Es un desplazamiento debido al movimiento orbital promedio del oleaje en dirección de la propagación de la onda. Esta deriva surge por el hecho de que en la parte superior de su órbita las partículas avanzan más rápido que hacia atrás en la parte inferior. La velocidad de deriva de Stokes se define como la diferencia entre la velocidad promedio lagrangiana de una parcela de fluido y la velocidad euleriana media del fluido (Ríos, 2021). Las ondas de gravedad superficiales en el océano abierto son en su mayoría causadas por los vientos; por esta razón, a menudo se supone que la velocidad de deriva de Stokes pue-

de parametrizarse como una fracción de la velocidad del viento en esta misma dirección, típicamente 1-2 % (Tamura et al., 2012).

- Efectos inerciales: Son aquellos debidos al tamaño y flotabilidad del trazador. Los efectos inerciales en una partícula lagrangiana se modelan con la ecuación de Maxey-Riley (Maxey y Riley, 1983), y pueden incluir efectos de arrastre del agua y del viento. Mediante soluciones numéricas de esta ecuación y el análisis de trayectorias de derivadores sin lastre, Beron-Vera et al. (2016) concluyeron que el transporte de partículas superficiales en remolinos mesoescalares varía debido a efectos inerciales. Para remolinos anticiclónicos, las partículas más pesadas (ligeras) se atraen (repelen), mientras que los ciclónicos se comportan de manera opuesta. Con relación a la acumulación de desechos marinos superficiales, Beron-Vera et al. (2016) señalan que los procesos de escala global impulsados por la convergencia de Ekman son demasiado lentos para explicar por sí solos la acumulación en las islas de basura, y que para una aproximación más realista es necesario incorporar los efectos inerciales. La relación entre la densidad del fluido y del objeto puede cambiar en el espacio y tiempo, modificando estos efectos.
- Deriva de Ekman: Consiste en el desplazamiento inducido por el viento en la superficie del océano, cuya dirección es a 45° a la derecha del viento en el hemisferio norte. Sin embargo, se ha visto que la desviación de la deriva superficial de boyas respecto a las corrientes geostróficas es menor, posiblemente por la deriva de Stokes y efectos inerciales (Huang, 1979). Respecto a la acumulación de desechos marinos superficiales, Kubota (1994) señalan a este mecanismo de Ekman como uno de los procesos más relevantes en la formación de la isla de basura del OPN, cuya ubicación asocian con la zona de convergencia superficial de esta deriva.

1.4. Circulación del Océano Pacífico Norte

Como ya mencionamos, en escalas planetarias las corrientes superficiales están dispuestas en patrones coherentes de grandes circulaciones que ocupan las cuencas de los principales océanos (Hartmann, 2015). Este tipo de giros se encuentran en latitudes entre los ± 10 y $\pm 45^\circ$, y son consecuencia de los efectos de rotación de la Tierra

en combinación con los vientos alisios y del oeste (Pedlosky, 1990). El giro subtropical del Océano Pacífico Norte es una de las mayores estructuras de circulación oceánica (Howell et al., 2012). La Figura 5 muestra un esquema de los principales sistemas de corrientes superficiales en el OPN.

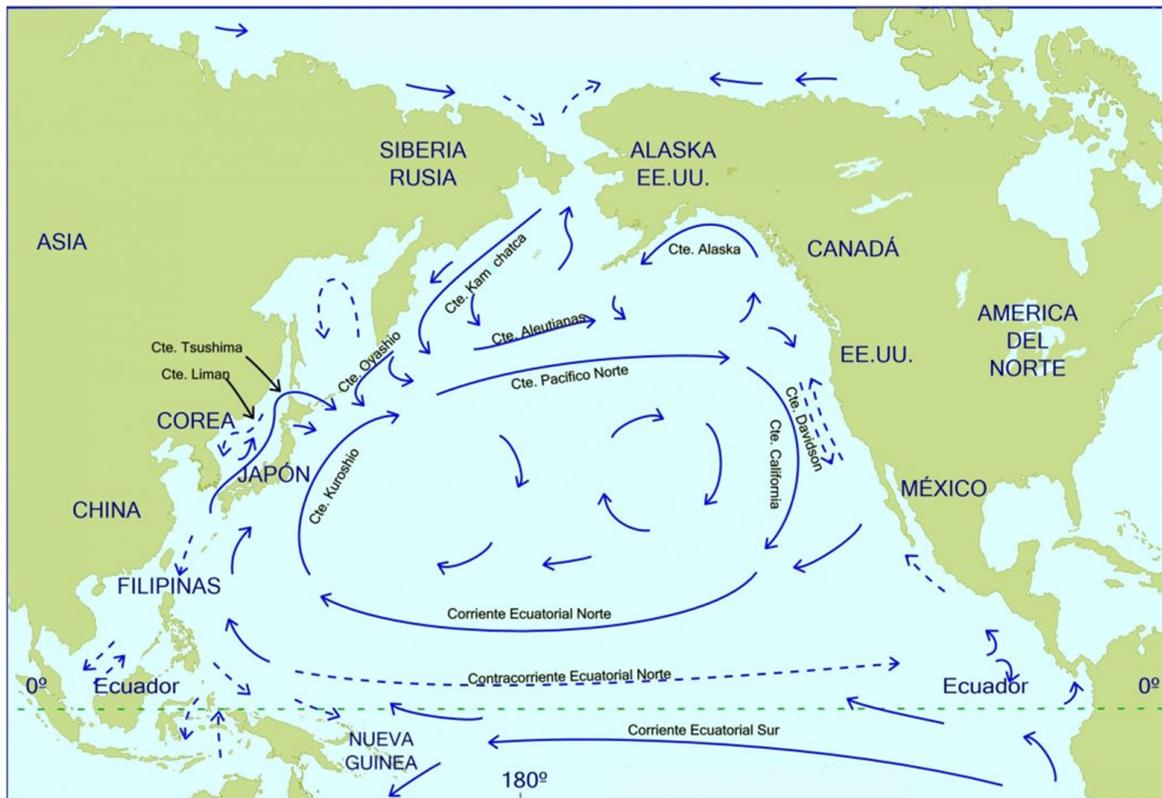


Figura 5. Principales corrientes del Océano Pacífico Norte (Oceánicos, 2021)

A lo largo del límite occidental de la cuenca existe una fuerte corriente que fluye hacia el polo, en una zona estrecha muy cerca del continente, llamada corriente de Kuroshio. La corriente de Kuroshio es una de las corrientes de frontera occidentales, como la corriente del Golfo en el Atlántico Norte. Estas corrientes son muy intensas -llegando a exceder 1.0 m s^{-1} - y están forzadas por el viento (Pedlosky, 1990). Las corrientes de frontera occidentales transportan agua de los trópicos a latitudes medias. En consecuencia, van acompañadas de fuertes gradientes térmicos, con agua más cálida al sureste y agua más fría al noroeste. Estos gradientes de temperatura persisten cuando la corriente se separa de la costa occidental y fluye hacia dentro de la cuenca oceánica (Hartmann, 2015). La corriente de Kuroshio se descompone en meandros y anillos, perdiendo su identidad clara a medida que el flujo se expande hacia el este,

en donde se le conoce como Extensión de Kuroshio (Pedlosky, 1990).

El flujo que se origina de la Extensión Kuroshio en el Pacífico central es la Corriente del Pacífico Norte. Su flujo es superficial, intenso y amplio. Esta corriente puede tomar dos caminos a medida que se acerca a la costa oeste de América del Norte: (1) en una rama subpolar que forma la Corriente de Alaska, y (2) en el giro subtropical que incluye la Corriente de California. La corriente de Alaska es impulsada tanto por las entradas de agua dulce a través de los límites costeros como por el sistema de vientos ciclónico. Las velocidades son máximas sobre la superficie cercana a la costa, con velocidades de 0.5 a 1.0 m s⁻¹ o incluso mayores (Strub y James, 2002).

La corriente de California es paralela a la costa de América del Norte. Su flujo de agua va de latitudes medias hacia el ecuador. Es una de las corrientes limítrofes del este, caracterizadas por ser lentas, extensas y con bajas temperaturas, debido a que son producto del afloramiento de agua fría subsuperficial impulsado por los vientos sobre la costa (Hartmann, 2015). La corriente de California gira hacia el oeste y confluye en la Corriente Ecuatorial del Norte a partir de los 20°N en verano, y en latitudes menores en invierno-primavera (Strub y James, 2002).

La Contracorriente Norecuatorial (CCNE) se encuentra entre 5° y 10°N, fluye hacia el este hasta aproximadamente 120°W y se debilita cerca del domo de Costa Rica (8°N, 92°W). La CCNE varía estacionalmente a partir de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). En verano la ZCIT está más al norte y las divergencias superficiales que genera impulsan la CCNE. En invierno la ZCIT se mueve hacia el sur y la NECC se debilita o se invierte (Strub y James, 2002).

1.5. Antecedentes de la isla de basura del OPN

A continuación se describen algunas de las investigaciones precedentes más importantes sobre la isla de basura en el OPN.

- Kubota (1994): Este autor realizó simulaciones numéricas de las trayectorias de trazadores superficiales en el OPN advectados por estimaciones climatológicas de las corrientes geostroficadas, de Ekman y de Stokes. La Figura 6 muestra la posición final de trazadores advectados en los tres tipos de experimentos. Combinando

diferentes forzamientos se encontró el siguiente mecanismo de tres pasos para la acumulación al norte de las islas hawaianas. En primer lugar, los trazadores se acumulan en la zona de convergencia de Ekman relacionada con los vientos alisios y del oeste. En segundo lugar, la basura flotante se mueve hacia el este por corrientes geostróficas como la Extensión Kuroshio. Finalmente, se acumula al norte de las islas Hawái por deriva de Ekman debido a la alta presión atmosférica del Pacífico Norte.

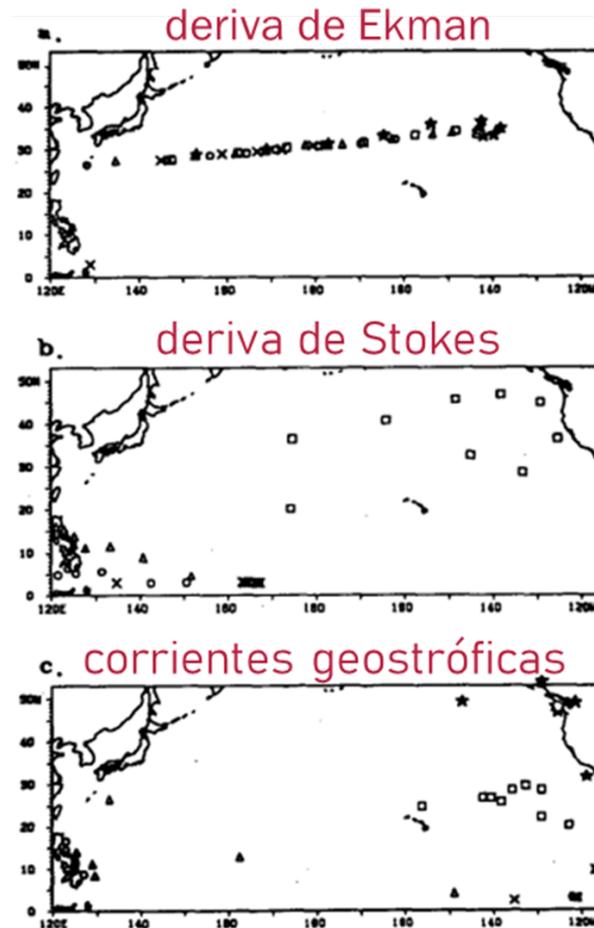


Figura 6. Posiciones finales de partículas advectadas por campos de velocidad de diferentes forzadores después de 5 años (Kubota, 1994).

- Maximenko et al. (2012): Usando matrices de transición (como las que se usarán en este trabajo) y derivadores superficiales, los autores detectaron los cinco sitios de acumulación global de desechos marinos. En sus conclusiones señalan que los movimientos de deriva están determinados por una combinación de corrientes geostróficas y el efecto del viento local -fuerza del viento aplicada directamente al objeto flotante, la deriva de Stokes y las corrientes de Ekman-. Por otro lado,

remarcan que diferentes tipos de trazadores se mueven de manera diferente bajo las mismas condiciones atmosféricas y oceánicas. Esto queda bien ilustrado por la diferencia entre los movimientos de los derivadores con y sin lastre bajo las mismas condiciones de corriente/ola/viento: los derivadores con lastre tienden a seguir las corrientes geostróficas (Figura 7a) mientras que los que han perdido el lastre se orientan hacia los centro de convergencia de la deriva de Ekman (Figura 7b).

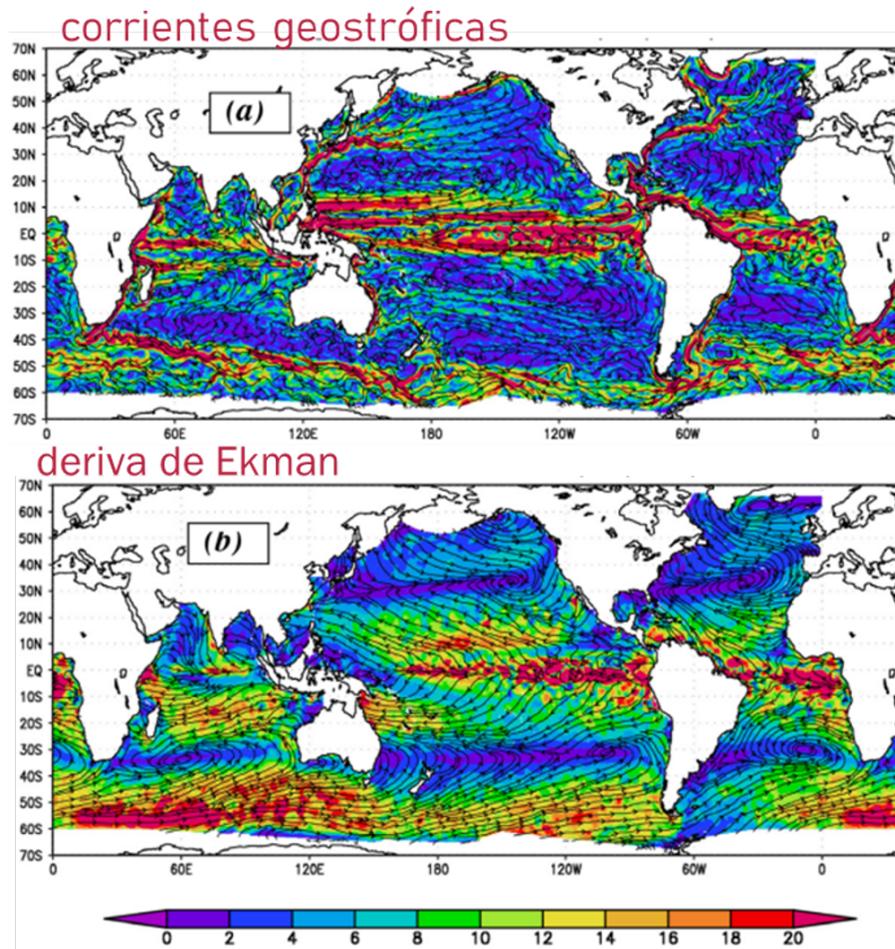


Figura 7. Líneas de corriente de (a) corrientes geostróficas medias y (b) corrientes de Ekman. Los colores indican la magnitud de la velocidad y las unidades son cm/s (Maximenko et al., 2012)

- Van Sebille et al. (2012): Usando herramientas similares, los autores analizaron el destino final de desechos marinos a nivel mundial desde escalas interanuales hasta centenarias. Entre sus principales resultados reportaron una mancha de basura más en el mar de Barents (Figura 8). También señalan que la dispersión entre las cuencas oceánicas es muy variable. Con excepción del Pacífico Norte,

todas las otras islas de basura desaparecen o disminuyen después de cientos de años, lo que sugiere que la conexión entre las cuencas continúa después de mucho tiempo. Es importante señalar que estos autores combinan registros de boyas con y sin lastre indistintamente.

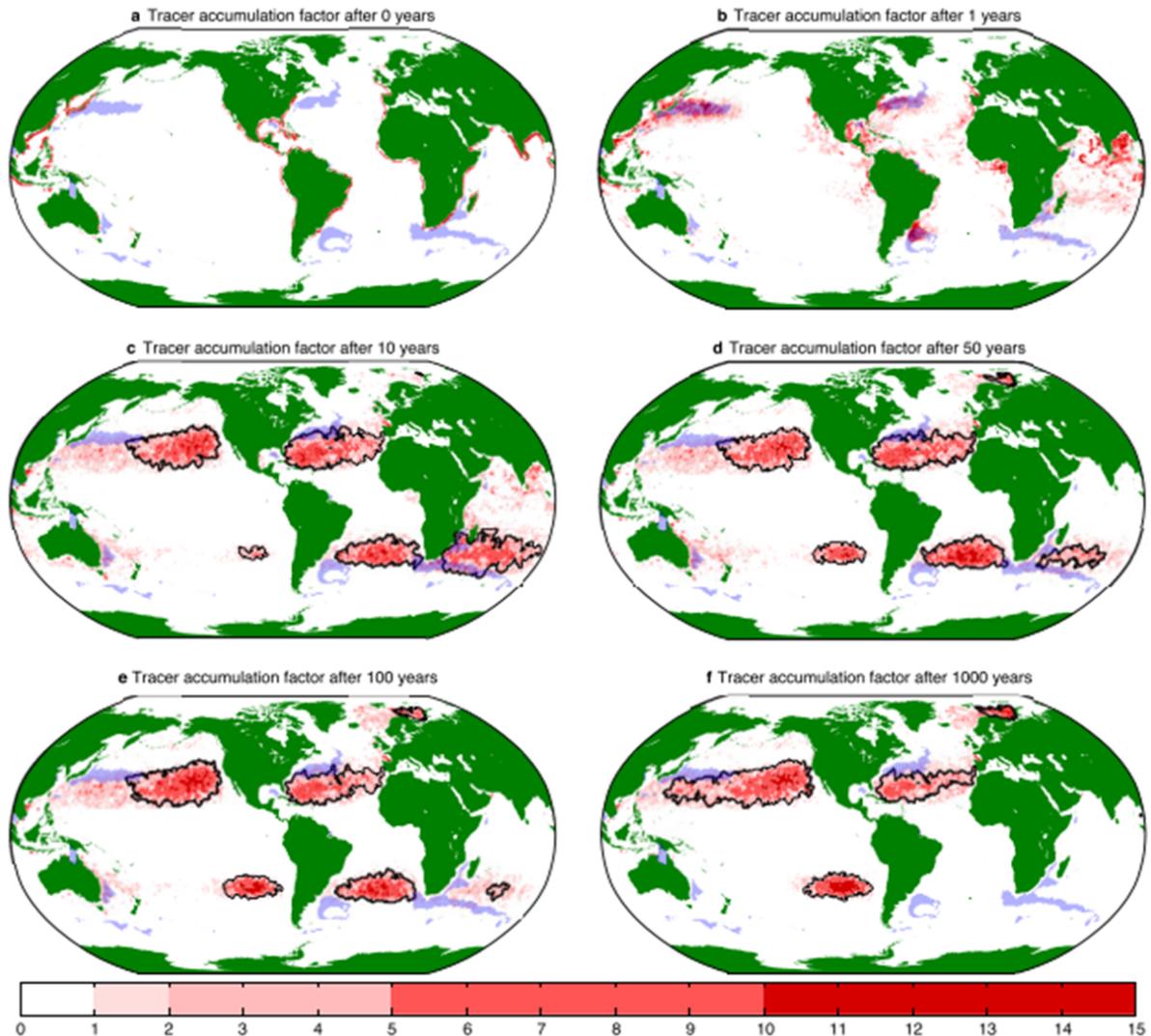


Figura 8. Ubicaciones y fuentes de las 6 islas de basura calculadas por van Sebille. El factor de acumulación del marcador (TAF) en (a) el momento de la liberación, (b) 1 año, (c) 10 años, (d) 50 años, (e) 100 años y (f) 1000 años. Las zonas azules indican áreas donde la variabilidad de la altura de la superficie del mar es mayor de 15 cm, una indicación de alta actividad de remolinos. (Van Sebille et al., 2012)

- Beron-Vera et al. (2016): Este trabajo señala que es importante considerar las diferencias en el comportamiento de los derivadores con lastre y sin lastre, ya que aquellos que lo han perdido son los que se acumulan claramente en los giros subtropicales, como lo hacen los desechos plásticos (Figura 9). También resalta que la acumulación es demasiado rápida para que la convergencia de Ekman la

explique, y propone que efectos de tamaño finito y de flotabilidad (es decir, inerciales) la aceleran. Este punto se demuestra mediante la integración de la trayectoria de partículas usando ecuaciones tipo Maxey-Riley, las cuales toman en cuenta efectos inerciales. Además, en estudios previos (Beron-Vera et al., 2015) se explica que en la mesoescala el transporte es fundamentalmente generado por efectos cuasi geostroficados, que solo lograrían la acumulación de desechos al ser combinados con efectos inerciales.

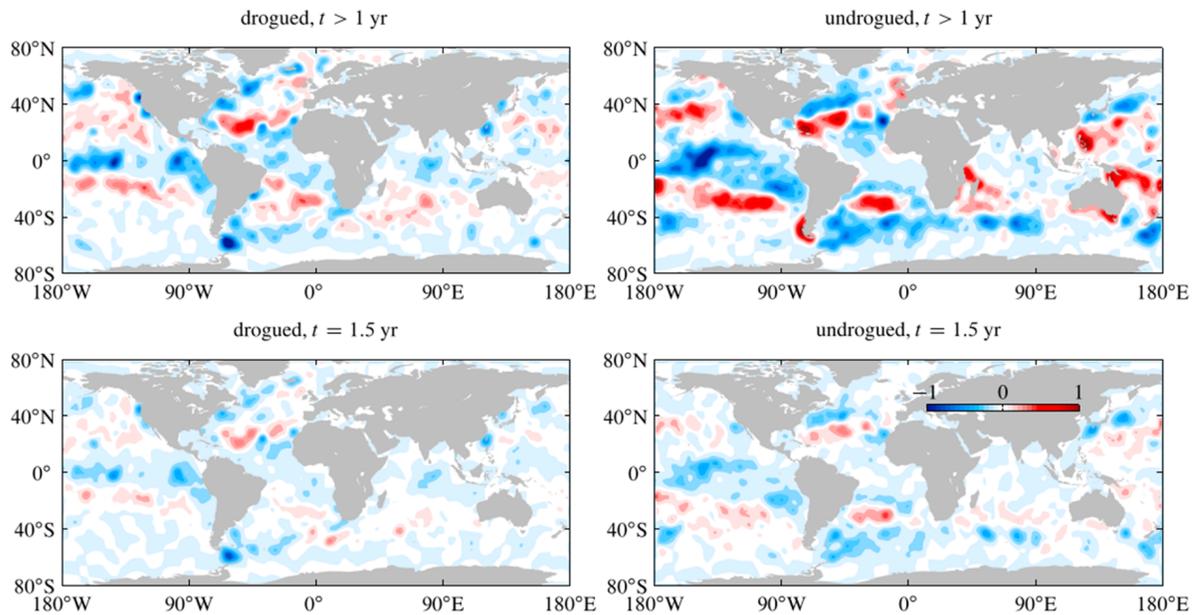


Figura 9. Diferencia de la densidad de derivadores del Programa Global de Derivadores de la NOAA entre 1979 y 2015, calculada en cada bin de $1^\circ \times 1^\circ$ y normalizada en el rango $[-1, 1]$. La fila superior (inferior) corresponde a la diferencia de densidades después de al menos 1 (1.5) años. La columna izquierda (derecha) corresponde a derivadores con lastre (sin lastre) (Beron-Vera et al., 2016)

- Bosi et al. (2021): En este trabajo se investigan las escalas de tiempo de dispersión desde la superficie del océano hacia las áreas costeras de acumulación (varamiento), tomando en cuenta la deriva de Stokes. Mediante la modelación de la advección de partículas, se encontró que la deriva de Stokes duplica la tasa de varamiento anual en comparación con el experimento de referencia -sin deriva de Stokes- (Figura 10). Después de 12 años la cantidad de partículas varadas fue un 20% mayor con deriva de Stokes, mostrando la importancia de este forzador en la dispersión de desechos marinos.

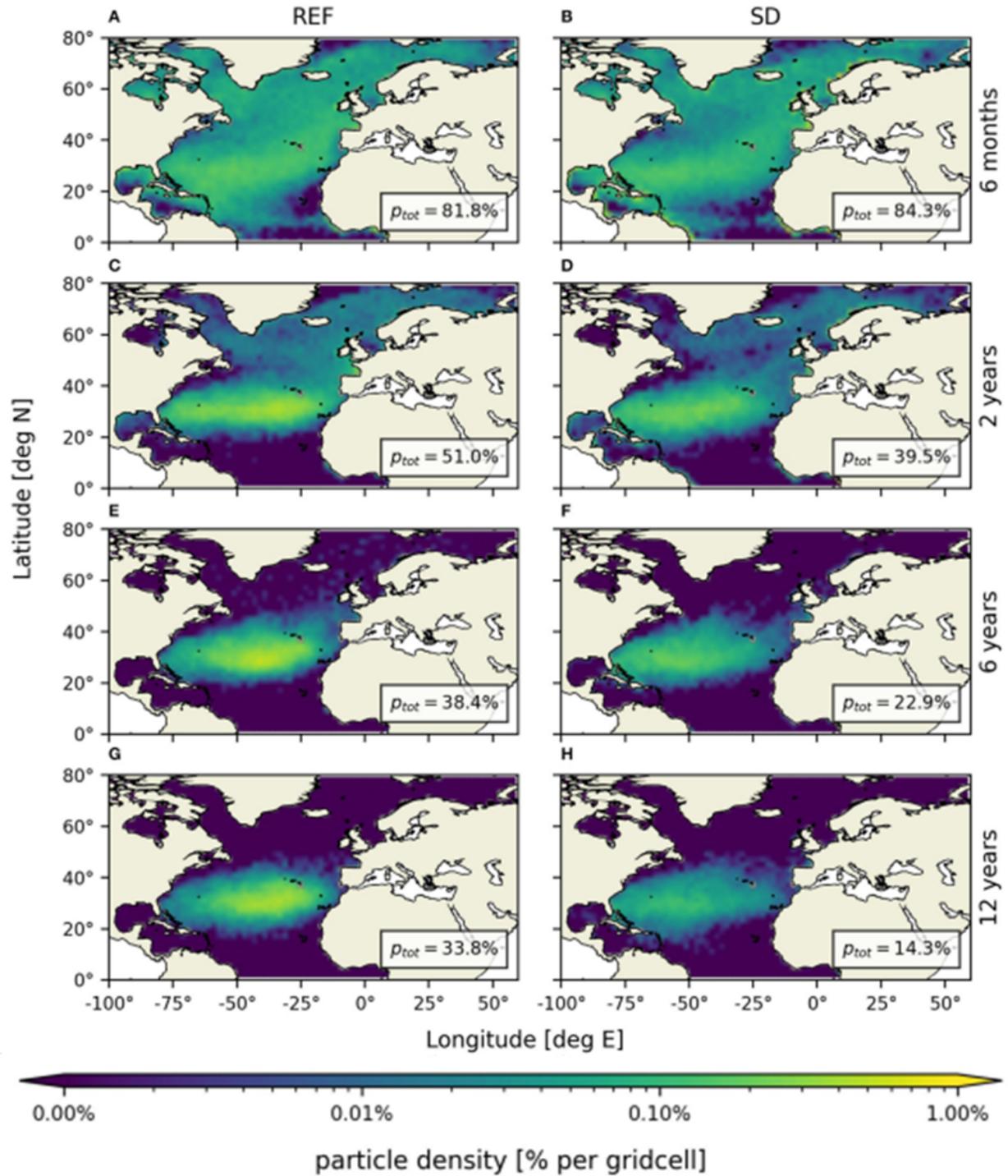


Figura 10. Densidad de partículas por bin ($2^\circ \times 2^\circ$) después de: 6 meses (A,B), 2 años (C,D), 6 años (E,F) y 12 años (G,H), obtenidas en el estudio numérico de Bosi et al. (2021) para el Atlántico Norte. Los colores representan la densidad relativa respecto a las partículas sembradas. El cuadro de texto indica la cantidad de partículas restantes, y la escala de colores es logarítmica.

1.6. Enfoque de la tesis

El camino de los desechos marinos desde la costa hasta los sitios de acumulación aun tiene varias interrogantes. Por ejemplo, para la isla de basura en el este del OPN:

- ¿Cuáles son las rutas preferentes de los desechos descargados desde localidades costeras en el continente americano hacia la isla de basura?
- ¿Qué cantidad de la descarga local arriba a la isla de basura?
- ¿Cuál es la diferencia relativa de desechos que aportan diferentes localidades?
- ¿La isla de basura y los caminos a ella son iguales durante todo el año?

Algunas de estas preguntas pueden ser difíciles de responder. Por ejemplo, aún se desconocen las tasas de fragmentación del plástico en el océano y el consecuente cambio en su dispersión a lo largo de su trayectoria (por cambios de densidad, tamaño, hundimiento). Si consideramos que mediciones *in situ* dentro de la isla de basura del OPN tomadas por Lebreton et al. (2018) muestran que las boyas y redes de pesca abandonadas representan la mayor parte (58,3%) del peso macroplástico total, significa que una buena parte de la basura, sobre todo aquella que ingresa del continente, se está perdiendo en el camino o en su llegada a la isla de basura.

En esta investigación nos enfocamos en conocer los diferentes caminos que siguen los desechos flotantes durante su recorrido hacia la isla de basura del OPN, en función del lugar donde fueron descargados. Para ello se realizaron una serie de experimentos estadísticos basados en registros de derivadores superficiales y en la implementación de matrices de transición y elipses de dispersión. Con este trabajo esperamos contribuir al conocimiento fundamental de futuras medidas de mitigación de la problemática de desechos marinos superficiales.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Caracterizar la formación de la isla de basura del Océano Pacífico Norte (OPN) a partir de fuentes puntuales de descarga mediante métodos estadísticos (matrices de transición y elipses de dispersión) basados en las trayectorias históricas de boyas de deriva superficiales.

1.7.2. Objetivos específicos

- Determinar la contribución relativa y tiempos de arribo de descargas instantáneas desde la costa Norteamericana a la isla de basura.
- Delimitar la isla de basura a partir de los experimentos estadísticos de descargas instantáneas.
- Determinar la contribución relativa de descargas continuas desde la costa norteamericana a la isla de basura.
- Describir y entender la variación temporal (bimestral) de la isla de basura.

Capítulo 2. Datos y métodos

2.1. Derivadores superficiales

Los experimentos numéricos que se utilizan en esta tesis se basan en herramientas estadísticas aplicadas a un conjunto histórico de datos observacionales del Programa Global de Derivadores de la NOAA en los EEUU (de aquí en adelante abreviado como PGD). Cada derivador se compone inicialmente de una boya superficial unida a un peso muerto o lastre a 15 m de profundidad. La boya transmite sus coordenadas al satélite ARGOS, las cuales posteriormente se interpolan para obtener las posiciones y velocidades cada seis horas (Figura 11).

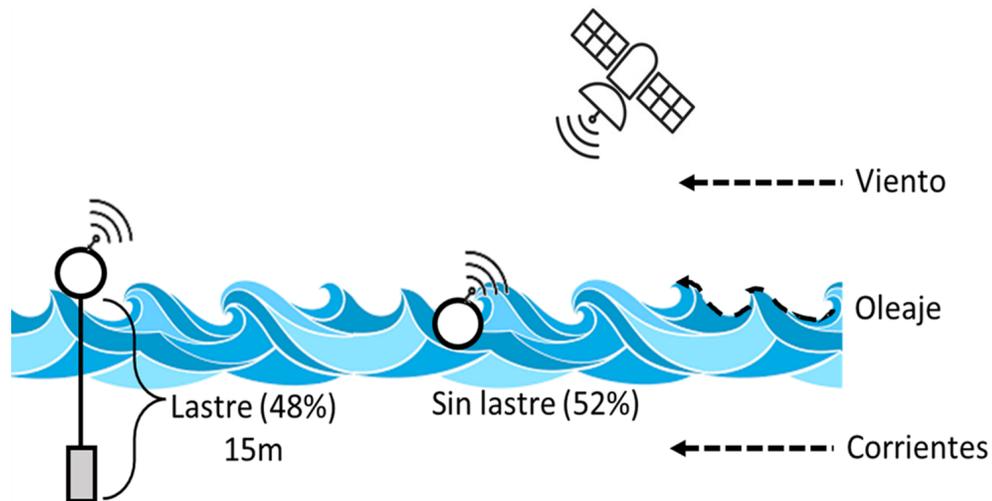


Figura 11. Esquema de forzadores implicados en la deriva de boyas superficiales. Los lastres se ubican a 15 m de profundidad y cerca de la mitad (52%) lo pierde durante su recorrido.

Los datos que alimentan a nuestros experimentos estadísticos son las trayectorias de 9230 boyas lanzadas en el OPN entre el 15 de febrero de 1979 y el 31 de diciembre de 2020. Se tiene registros dentro de un intervalo de tiempo de 41 años, 10 meses y 16 días, lo que da una media de 225 boyas lanzadas por año o 18 boyas al mes. El tiempo de vida medio del conjunto de boyas es de 9 meses o 267 días, con una desviación estándar de 342.4 días u 11 meses. Por otro lado, el mayor tiempo de vida encontrado fue de 10 años y medio.

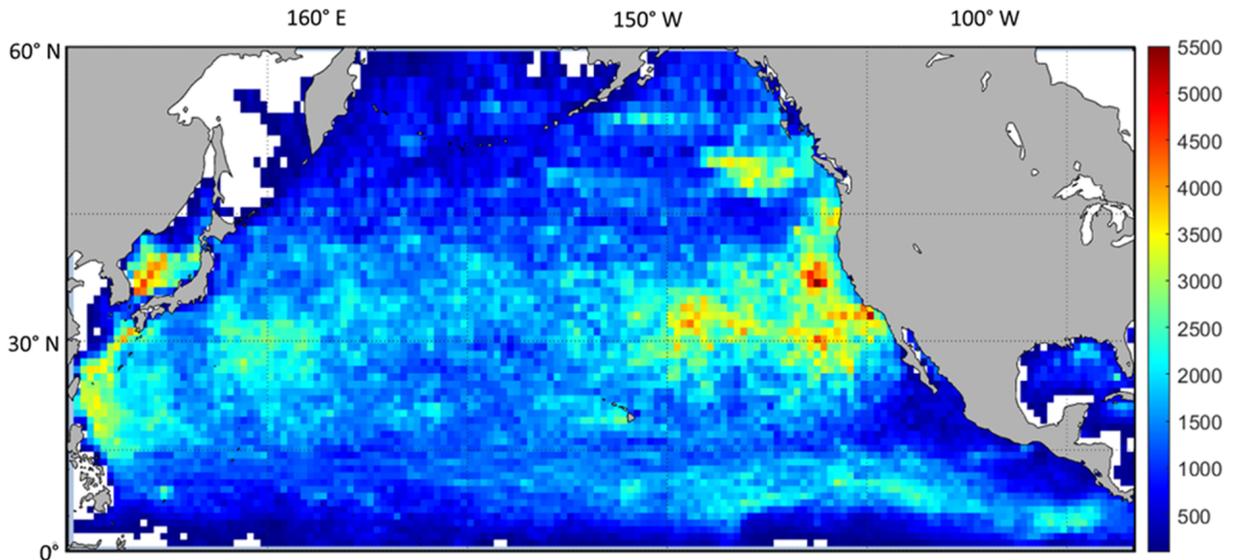


Figura 12. Número de datos por bin ($1^\circ \times 1^\circ$) de las boyas del Programa Global de Derivadores de la NOAA (EEUU). Los bins en blanco tienen menos de 100 datos.

Los análisis estadísticos requieren de conjuntos de datos grandes para mejorar su confiabilidad. La Figura 12 muestra la cantidad de registros totales por cada bin de $1^\circ \times 1^\circ$ durante el periodo de tiempo disponible. Se puede apreciar que en la mayor parte del OPN hay 100 o más registros por bin, y en algunas de las zonas de mayor interés en la parte oriental se tienen algunos miles de datos por bin. Sin embargo, existen algunas regiones en el OPN con menos de 100 registros durante los 41 años (que se identifican porque el bin se muestra en color blanco). Localizar las zonas con pocos registros es útil para identificar regiones con una mayor probabilidad de errores en los experimentos estadísticos. Estas zonas se encuentran principalmente en las costas asiáticas de la región oeste del OPN, así como en la frontera norte y sur del dominio. La Figura 13 muestra las posiciones iniciales, finales y las trayectorias de todos los derivadores. De manera general, se aprecia que las trayectorias muestrean casi por completo el OPN, por lo que se puede suponer que los registros históricos de las boyas son una buena aproximación para calcular estadísticas de la dispersión superficial en el OPN.

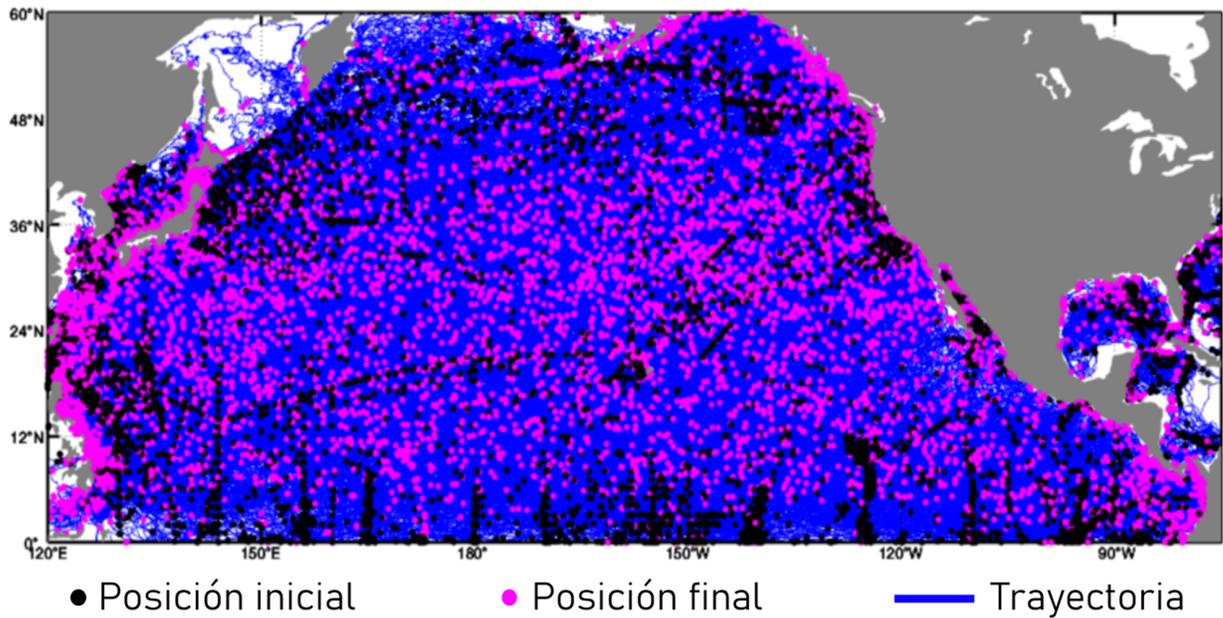


Figura 13. Posiciones iniciales, finales y trayectorias de 9230 derivadores lanzados entre los años 1979 y 2020 en el Programa Global de Derivadores.

Por otro lado, los registros de velocidad de las boyas en cada bin se interpolaron en un dominio discreto para obtener una climatología del campo de velocidad basada en los derivadores (Figura 14). Como se puede observar, la dirección y magnitud de los vectores obtenidos capturan las características principales de la circulación superficial del OPN. (1) En la región occidental se aprecia la intensa y estrecha corriente de Kuroshio. (2) Posteriormente, esta corriente se aleja de la costa asiática, convirtiéndose en la extensión de Kuroshio. (3) En el norte, el movimiento en dirección este refleja la corriente del Pacífico Norte hasta la costa norteamericana. En este punto, la corriente del Pacífico Norte se descompone en (4) la corriente de Alaska (al norte) y (5) la corriente de California (al sur). Finalmente, el giro anticiclónico subtropical del OPN se completa en su frontera sur con (6) la corriente Norecuatorial.

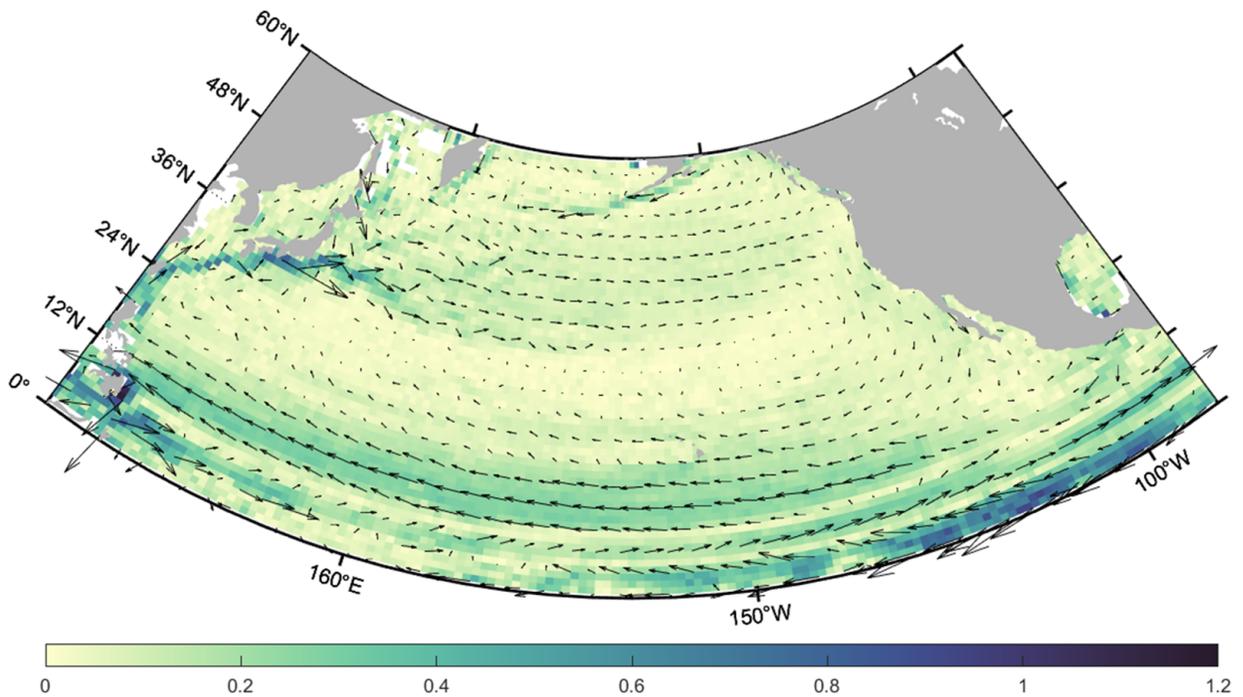


Figura 14. Campo de velocidad euleriano [m/s] calculado a partir de las velocidades promedio de los derivadores superficiales en cada bin. Las superficies representan la magnitud de la velocidad. La velocidad máxima es 1.52 m/s. Solo se presentan vectores cada 3 grados.

Complementamos esta sección con el cálculo de las funciones de densidad de probabilidad (PDF) de las componentes u , v de la velocidad de las boyas (Figura 15). Las PDFs se pueden estandarizar (páneos inferiores) restando la media en cada bin para cada componente y dividiendo entre la desviación estándar correspondiente (Zavala Sansón, 2021). Para velocidades pequeñas las PDFs son aproximadamente gaussianas. Las colas extendidas sugieren una forma no gaussiana de las distribuciones. Zavala Sansón et al. (2018) señalan que estas desviaciones pueden deberse a la presencia de eventos energéticos, como corrientes y remolinos de meso y gran escala. En el OPN pueden ser la corriente de Kuroshio, la corriente Norecuatorial y la de California. Estas circulaciones intensas y persistentes pueden incidir en la dispersión superficial.

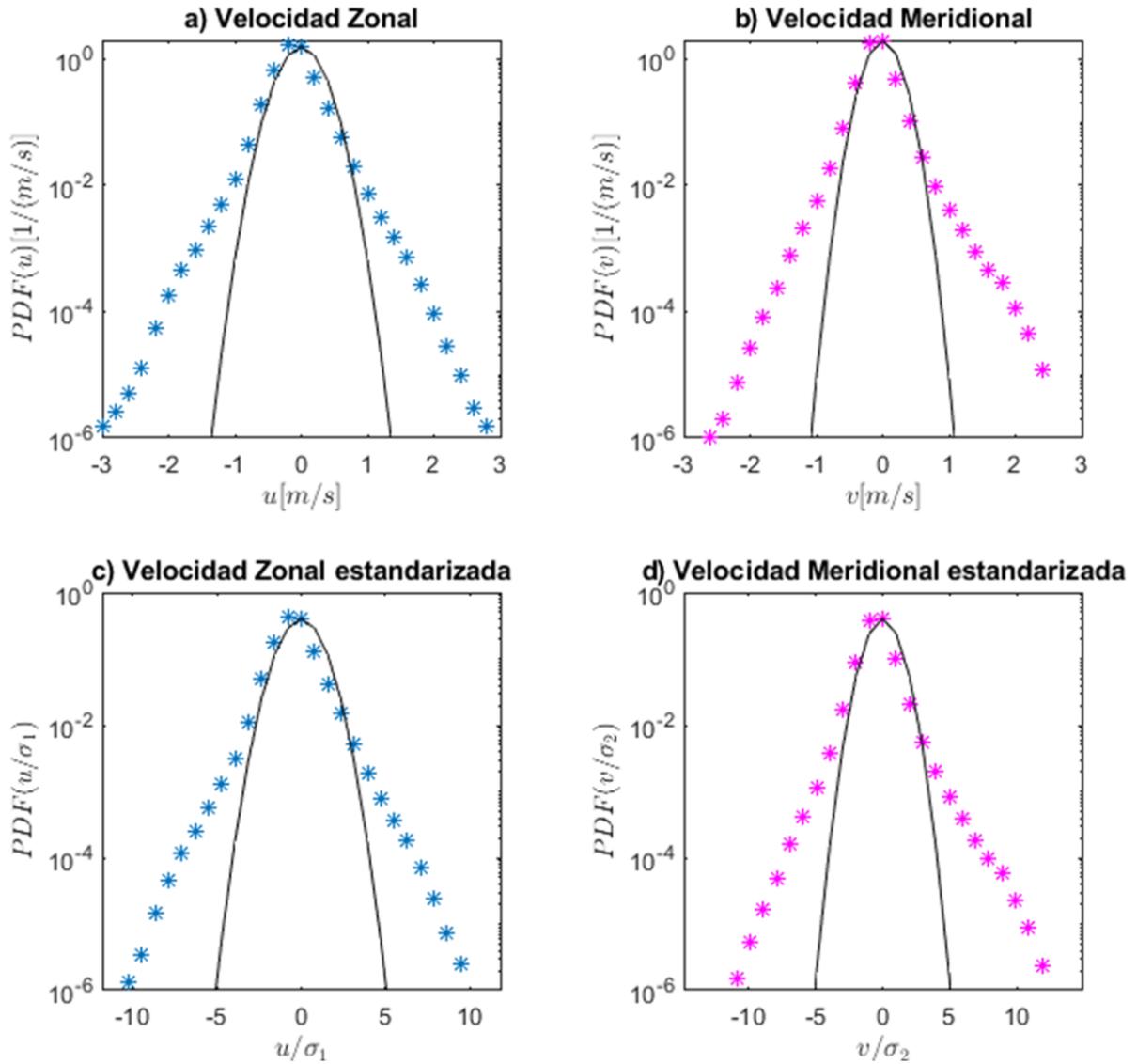


Figura 15. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) de las componentes de velocidad de las boyas (estrellas) para (a) registros zonales y (b) meridionales. Las líneas continuas indican la distribución normal. Las PDF corregidas para ambas direcciones se muestran en los paneles (c) y (d).

2.2. Matrices de transición

Este método nos permite capturar la dispersión superficial en las principales cuencas oceánicas, así como resolver la conectividad entre ellas (Van Sebille et al., 2012). Para construir estas matrices, la zona de estudio se divide en pequeñas regiones, en este caso de $1^\circ \times 1^\circ$, llamadas bins. Como se vio anteriormente (Figura 12), dentro de cada bin existe un número significativo de datos de boyas superficiales. Con esta información podemos calcular la probabilidad de pasar de un bin a otro en un paso de tiempo determinado. A continuación se describe la aplicación del método con base en

la teoría expuesta por Maximenko et al. (2012).

La densidad de probabilidad de que un derivador en una posición inicial (\mathbf{r}_0) al tiempo inicial (t_0), pase a una posición (\mathbf{r}) al tiempo (t) es $P(\mathbf{r}_0, t_0|\mathbf{r}, t)$. Esta probabilidad se puede reescribir como

$$P(\mathbf{r}_0, t_0|\mathbf{r}, t) = P(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}; T), \quad (1)$$

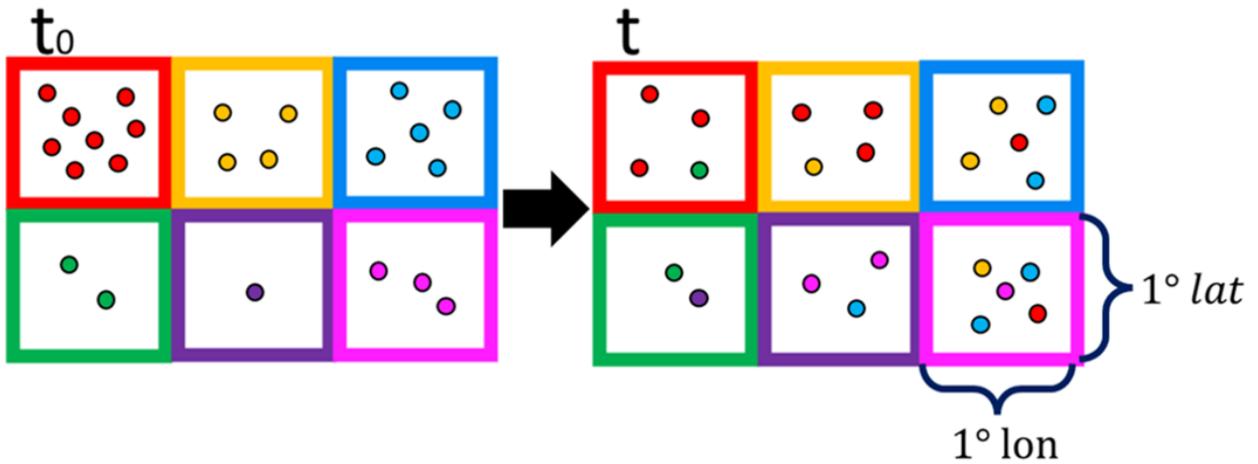
donde se expresa que dicha probabilidad de transición solo depende de cuánto tiempo pasó entre el cambio de posición de un bin a otro ($T = t - t_0$), independientemente del tiempo inicial t_0 . Esto es consecuencia de suponer que la dispersión de derivadores es estadísticamente estacionaria, es decir, ocurre de la misma forma para cada periodo T en cada bin. Por lo tanto, la probabilidad de transición es independiente de tiempos previos en todo momento.

La densidad de probabilidad se calcula como la fracción correspondiente al número de derivadores (N) que llegan al bin en la posición \mathbf{r} desde el bin en la posición \mathbf{r}_0 , transcurrido el tiempo T :

$$P(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}; T) = \frac{N(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}; T)}{\int N(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}; T) d\mathbf{r}}. \quad (2)$$

Nótese que el denominador es la suma de todos los derivadores en cualquier posición \mathbf{r} que inicialmente estaban en \mathbf{r}_0 . Las probabilidades para todos los bins están contenidas en las llamadas *matrices de transición*, las cuales son matrices cuadradas cuyas dimensiones coinciden con el número total de bins en el dominio.

Una representación esquemática del calculo de probabilidad se encuentra en la Figura 16. Los cuadros de la parte superior representan bins con diferente número de partículas al tiempo t_0 y a un tiempo t posterior. Los rectángulos de colores de la parte inferior contienen las probabilidades de llegar al bin de ese color, a partir de haber estado antes en el bin que señala el color de los números. Es decir, los derivadores del bin azul al tiempo t (en la esquina superior derecha) nos dicen que la probabilidad de que las boyas desde el bin rojo lleguen a esta región es de $1/8$ (debido a que inicialmente en el bin rojo hay ocho derivadores, pero después del tiempo T solo uno de ellos alcanzó a llegar al bin azul). El resto de las casillas se completan con la misma lógica. En el caso de que ningún derivador haya llegado de un bin a otro en el tiempo T , la probabilidad entre esos dos bins es cero.



$$T = t - t_0$$

$$P(r_0, t_0 | r, t) = P(r_0 | r; T)$$

3/8	0	0	3/8	1/4	0	1/8	2/4	2/5
1/2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1/5	1/8	1/4	2/5
1/2	1/1	0	0	0	2/3	0	0	1/3

Figura 16. Esquema de para entender como funciona una matriz de transición. Los cuadros de arriba representan seis bins con cierto número de partículas al tiempo inicial (izquierda) y al tiempo t (derecha). Los rectángulos inferiores constituyen la matriz de transición de 6×6 que contiene las probabilidades de pasar de un bin al tiempo t_0 a otro bin al tiempo $T = t - t_0$ (ver texto para mayores detalles).

Conociendo la conexión entre los bins podemos obtener la concentración de un trazador superficial al tiempo $t + T$ en la posición \mathbf{r} , mediante la integral

$$C(\mathbf{r}, t + T) = \int C(\mathbf{r}_0, t) \cdot P(\mathbf{r}_0 | \mathbf{r}; T) \cdot d\mathbf{r}_0 + S(\mathbf{r}). \quad (3)$$

Esta ecuación nos dice que para calcular la concentración en el bin ubicado en la posición \mathbf{r} después de un tiempo T , necesitamos multiplicar la concentración inicial del trazador en cada bin ubicado en \mathbf{r}_0 por la probabilidad de pasar al bin que nos interesa. Esto nos dará la contribución de dicho bin inicial, por lo que es necesario sumar las

contribuciones de todos los posibles bins iniciales. Si además se añaden fuentes -lo que serían descargas continuas- o sumideros de trazadores, es necesario agregarlas con un término extra denotado en este caso como $S(\mathbf{r})$. La concentración obtenida se puede volver a calcular para uno o más periodos T en forma iterativa, de modo que se puede simular su evolución durante tiempos tan largos como se requiera.

Para este estudio, hemos utilizado un conjunto de matrices de transición calculadas por Van Sebille et al. (2012) en el proyecto “Plastic a Drift”, las cuales consideran todos los registros de derivadores superficiales del PGD a nivel global hasta ese momento. Estas matrices se pueden obtener de manera libre en la siguiente liga: <http://plasticadrift.org/>. Las matrices contienen las probabilidades de transición entre bins en un periodo T de dos meses. Para considerar las variaciones que la dispersión superficial puede tener a través del año, el registro histórico de datos se separó en seis subconjuntos bimestrales, con los cuales se construyeron seis matrices de transición, una para cada bimestre. Usar estas seis matrices iteradamente nos permite rastrear la evolución de una mancha superficial cada dos meses durante el tiempo y desde la ubicación que deseemos. Las matrices son globales y tienen dimensiones de 65341×65341 .

2.3. Elipses de dispersión

Las elipses de dispersión son un método que permite describir estadísticamente la ruta, área y rapidez de separación de N trazadores o partículas liberados desde una fuente puntual (Zavala Sansón et al., 2017). Para ello, necesitamos calcular la posición del centro, el tamaño de los semiejes y la orientación de la elipse a cada tiempo. Estas características de las elipses se resumen en la Figura 17.

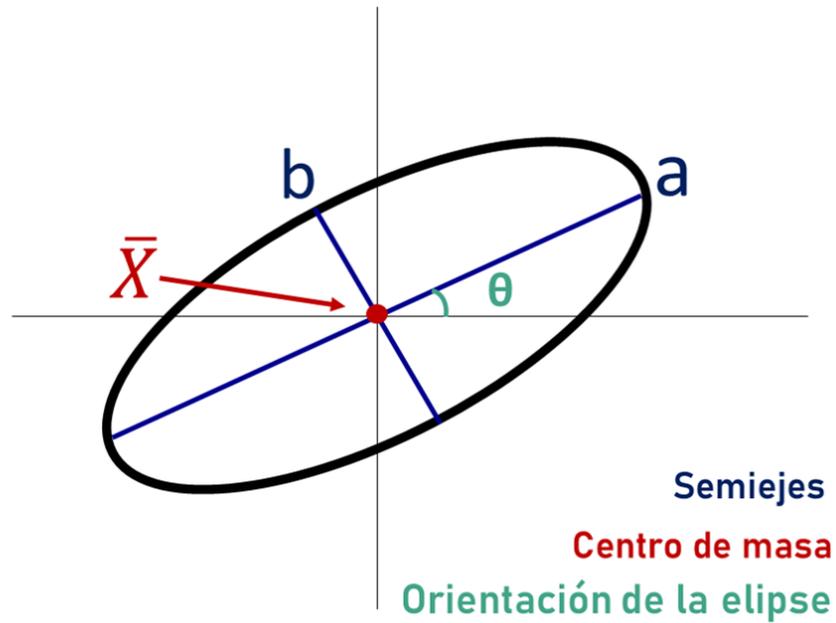


Figura 17. Características de una elipse de dispersión.

El centro de la elipse es la posición media de la nube de partículas o mancha de trazador conforme se dispersa. Esta posición media se define como:

$$\bar{X}_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [x_i^k(t) - x_i^k(0)], \quad (4)$$

donde $x_i^k(t)$ es la posición en la dirección i del trazador k al tiempo t . En este caso i puede tener valores de 1 y 2, los cuales corresponden a la dirección zonal y meridional, respectivamente. La barra superior indica el promedio del conjunto.

El tamaño de los semiejes señala la magnitud de la dispersión, mientras que la orientación de la elipse es la dirección preferencial. Para encontrar estas cantidades se utiliza la matriz de covarianza definida como

$$C_{ij}(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N [x_i^k(t) - x_i^k(0) - \bar{X}_i(t)][x_j^k(t) - x_j^k(0) - \bar{X}_j(t)]. \quad (5)$$

Dado que se construye con las posiciones zonales y meridionales, C_{ij} es una matriz de 2x2. Los términos en la diagonal son las componentes meridionales y zonales de la

dispersión relativa

$$\bar{R}_i^2(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N [x_i^k(t) - x_i^k(0) - \bar{X}_i(t)]^2. \quad (6)$$

Los semiejes de la elipse de dispersión son proporcionales a la raíz cuadrada de los eigenvalores de la matriz de covarianza, que se denotan como $\lambda_U(t)$, $\lambda_V(t)$:

$$a(t) = c\lambda_U^{\frac{1}{2}}(t), \quad (7)$$

$$b(t) = c\lambda_V^{\frac{1}{2}}(t). \quad (8)$$

La constante de proporcionalidad c es un número real positivo y arbitrario que permite escoger el tamaño de la elipse (en este trabajo se usa $c = \sqrt{2}$). A su vez, la orientación θ de la elipse corresponde a la dirección del eigenvector asociado con el eigenvalor máximo respecto al eje zonal. Supongamos que dicho eigenvector es $\mathbf{U}(t) = (U_1, U_2)$, entonces:

$$\theta(t) = \arctan \frac{U_2(t)}{U_1(t)}. \quad (9)$$

2.4. Diseño experimental

Se eligieron siete sitios de descarga, como se muestra en la figura 18. Para elegir estas localidades buscamos zonas urbanas sobre la costa con un potencial alto de producción de desechos plásticos relacionado con su densidad poblacional. Tratamos de seleccionar ciudades separadas lo más homogéneamente posible y que en conjunto cubrieran la costa este del OPN. Para fines de comparación y debido a su cercanía con la isla de basura, se incluyó a las islas de Hawaii como sitio de descarga. Inicialmente también se realizaron experimentos desde ciudades de la costa oeste, pero la falta de registros de derivadores en zonas cercanas generaron una acumulación de masa excesiva y poco realista, por lo que se descartaron. Problemáticas similares se abordan la Sección 4.6.

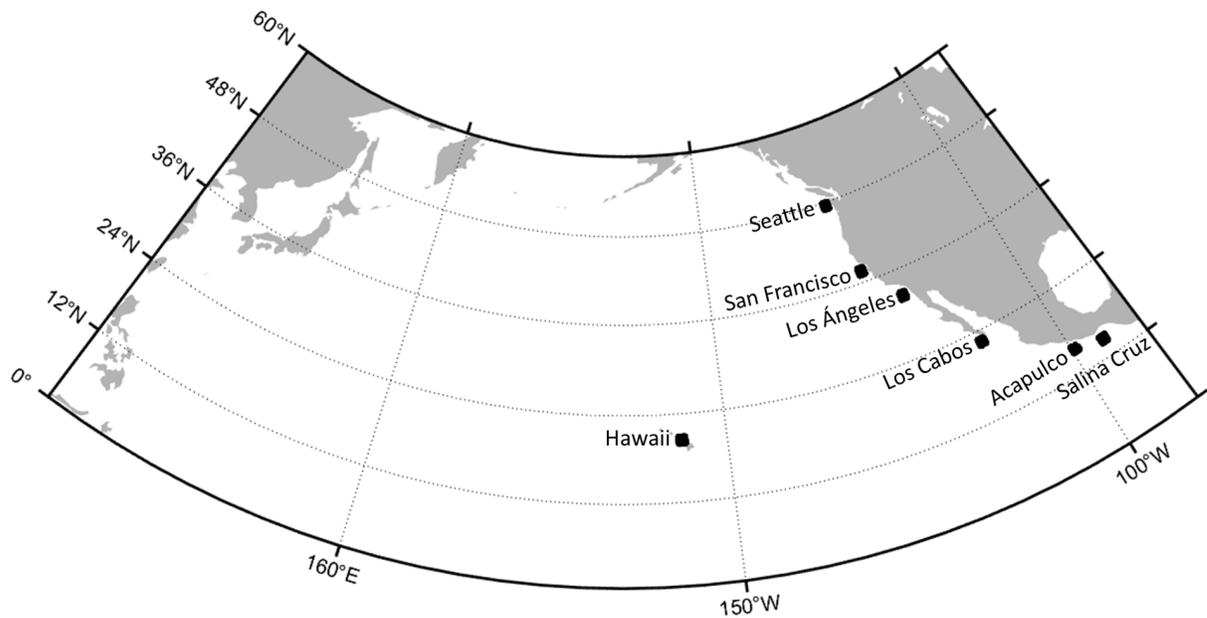


Figura 18. Ubicaciones de los siete sitios de descarga

Se llevaron a cabo experimentos con descargas puntuales de dos tipos: instantáneas y continuas. Las descargas instantáneas son unitarias y se prescriben solo en el tiempo inicial; a partir de entonces, la concentración inicial evoluciona de acuerdo a las probabilidades contenidas en las matrices de transición y se monitorea su dispersión mediante las elipses de dispersión. Para los experimentos de descargas continuas la concentración en la fuente puntual se mantiene para cada paso de tiempo, es decir, se realiza una descarga puntual por bimestre. Estos experimentos simulan el vertido de material al océano a una tasa constante.

La liberación del trazador se realizó en los cuatro bins del océano más adyacentes a cada ubicación. Estos bins se encuentran acomodados en un arreglo de 2x2, cuyas coordenadas de cada bin están señaladas en la Tabla 1. La idea de usar cuatro bins en lugar de uno para simular la fuente puntual surgió de buscar resultados más robustos que no dependieran de la probabilidad de un solo bin. Para cada localidad la descarga unitaria instantánea se repartió equitativamente entre los cuatro bins al tiempo inicial (25 % cada uno). En las descargas continuas dicha distribución se aplicó cada bimestre.

Tabla 1. Localizaciones de los diferentes sitios geográficos usados para los experimentos estadísticos de descargas puntuales. La concentración inicial unitaria se descarga en cuatro bins iniciales: (longitud 1, latitud 1), (longitud 1, latitud 2), (longitud 2, latitud 1) y (longitud 2, latitud 2).

Ciudad	Longitud	Latitud
Hawaii	-157,-156	21, 20
Seattle	-124, -123	38, 37
San Francisco	-119, -118	33, 32
Los Ángeles	-111,-110	23, 22
Los Cabos	-100,-99	16, 15
Acapulco	-96, -95	15, 14
Salina Cruz	-157, -156	21, 20

Es importante remarcar que para todos los experimentos el trazador es igual, independientemente de la ubicación de la descarga. En otras palabras, suponemos que todos los lugares emiten la misma cantidad de material al mar. Si bien esta no es una aproximación realista, resulta útil para nuestro objetivo de entender los efectos relativos, no absolutos, asociados a la localización de las descargas.

Por otro lado, las elipses de dispersión que calculamos para rastrear a las descargas puntuales tienen dos criterios base en su construcción:

- La posición del centro de masa se mide solamente con las concentraciones dentro de un subdominio en la parte oriental del OPN. Elegimos la región entre las longitudes de -240° a -90° y latitudes de 0° a 60° , como se muestra en la Figura 19. Este criterio permite caracterizar a la isla de basura en el este del OPN sin que los cálculos resulten afectados por la pérdida de trazadores en las fronteras oeste, norte y sur de la cuenca. Los problemas asociados se discuten en la Sección 4.6.
- Solo se consideran bins con concentraciones mayores al 0.05 % de la descarga inicial para dejar fuera de los cálculos a los bins con concentraciones marginales. El valor de la concentración límite mínima se eligió de manera arbitraria. Las implicaciones de esta elección se analizan en la Sección 3.2.

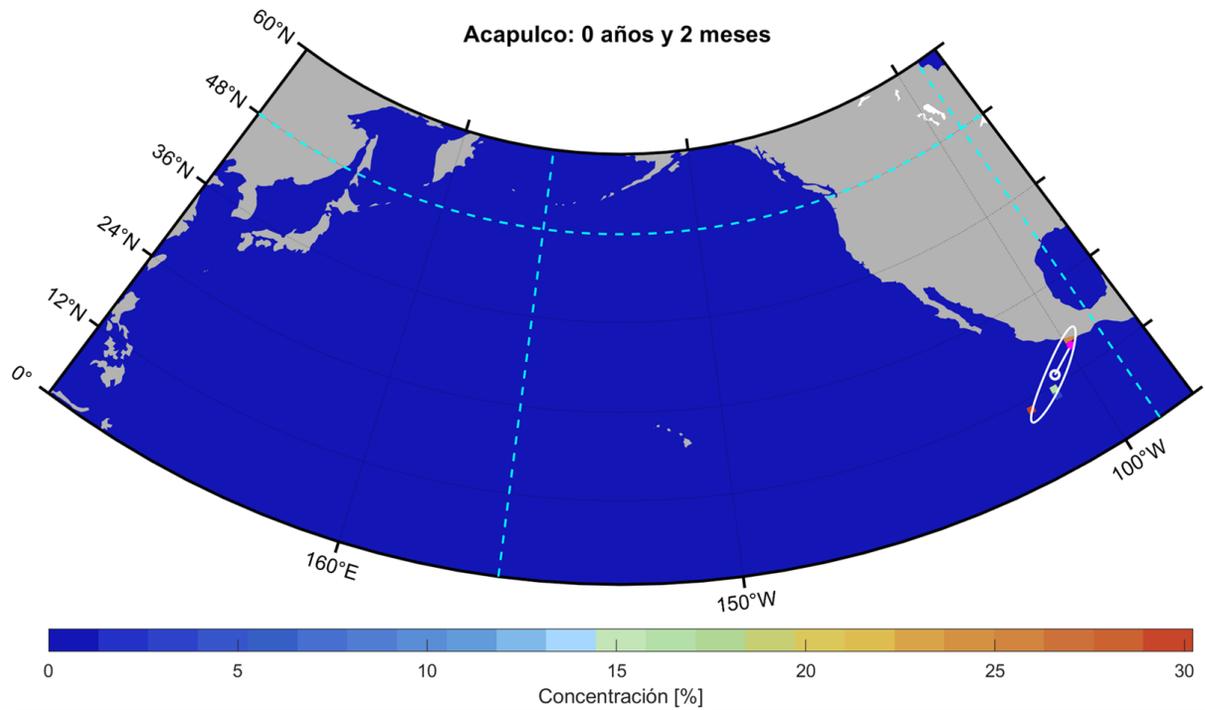


Figura 19. Subdominio en la parte este del OPN sobre el cual se calculan las elipses de dispersión que rastrean a la isla de basura: longitudes de -240° a -90° y latitudes de 0° a 60° (líneas azul claro). La elipse representa la dispersión en los primeros dos meses después de una descarga puntual desde Acapulco.

Las características de las elipses de dispersión basadas en la evolución de las concentraciones obtenidas en los experimentos estadísticos de las descargas instantáneas permitieron delimitar la isla de basura, como se describirá en la Sección 3.2.

Capítulo 3. Resultados

Realizamos una serie de experimentos estadísticos que en conjunto buscan entender la contribución de descargas puntuales desde las costas de América del Norte, la delimitación de la isla de basura y sus variaciones temporales (bimestrales). Para ello se realizó la iteración de las matrices de transición, así como la construcción de elipses de dispersión con las características señaladas anteriormente. La intención es estimar la ruta de las descargas de desechos marinos flotantes desde diferentes localidades a la isla de basura.

3.1. Contribución de descargas instantáneas

Estos experimentos simulan una descarga instantánea para cada localidad a lo largo de 30 años. Las características de las elipses (trayectoria, razón de aspecto, tamaño y orientación) cuantifican espacialmente la dispersión a cada tiempo.

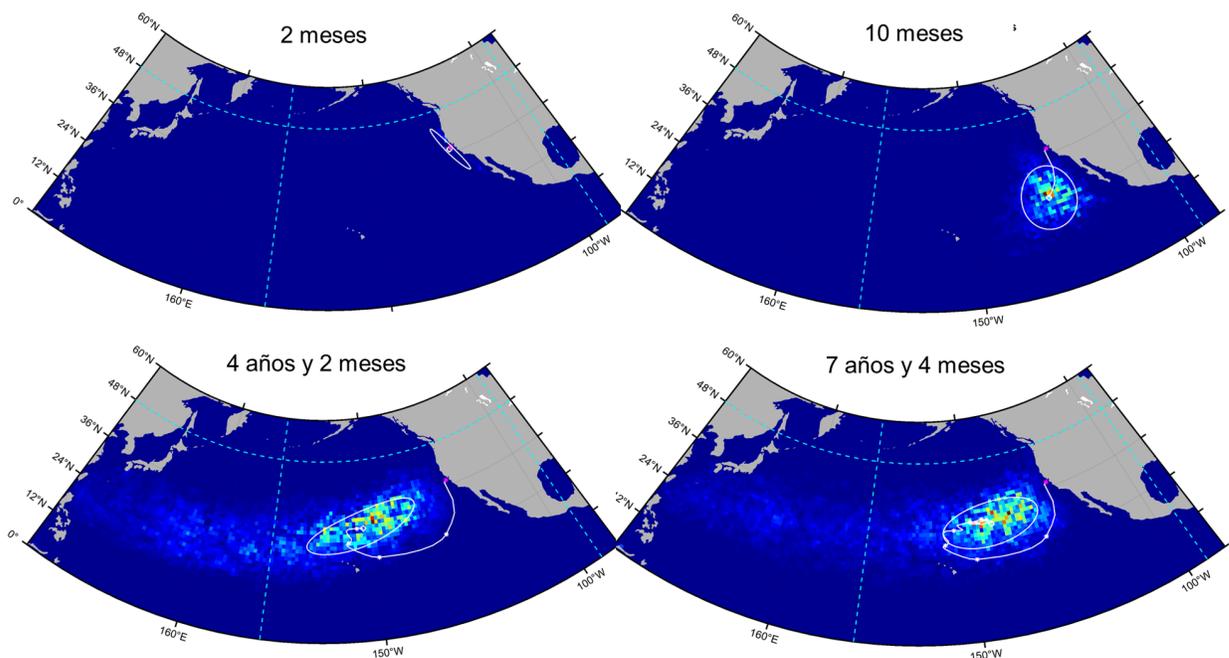


Figura 20. Evolución de la concentración de una carga puntual liberada en San Francisco (punto magenta) a cuatro tiempos diferentes hasta el tiempo de arribo. La línea blanca indica la trayectoria del centro de masa (cada punto blanco indica un año). La escala de colores varía en función de las concentraciones máximas del subdominio este para cada tiempo.

La Figura 20 es un ejemplo representativo de la evolución de un experimento de descarga instantánea cerca de la ciudad de San Francisco. Mostramos cuatro tiempos

del experimento, desde la descarga inicial hasta el tiempo de arribo a la isla de basura. En los primeros dos meses la mancha se dispersa preferentemente paralela a la costa - en mayor medida hacia el sur-. Diez meses después de la descarga, podemos observar que la elipse indica una dispersión casi isotrópica (igual en todas direcciones). También observamos que la trayectoria del centro de masa continúa moviéndose en dirección sur. Después de cuatro años y dos meses, se observa una elipse más alargada, lo que indica una mayor dispersión en una dirección preferencial. Esta dispersión se da principalmente desde la zona de convergencia subtropical (aproximadamente entre los 25° y 35° de latitud, señalada en la Figura 3) hasta donde se ha documentado que se encuentra la isla de basura (entre Hawaii y California). Para llegar a esa zona, el centro de masa se deslizó hacia el oeste hasta casi los 180° y posteriormente retorna al este. Finalmente, en el tiempo de arribo a los siete años y cuatro meses, la elipse tiene una concentración del trazador en su interior más densa respecto a su alrededor -comparado con el paso de tiempo anterior-.

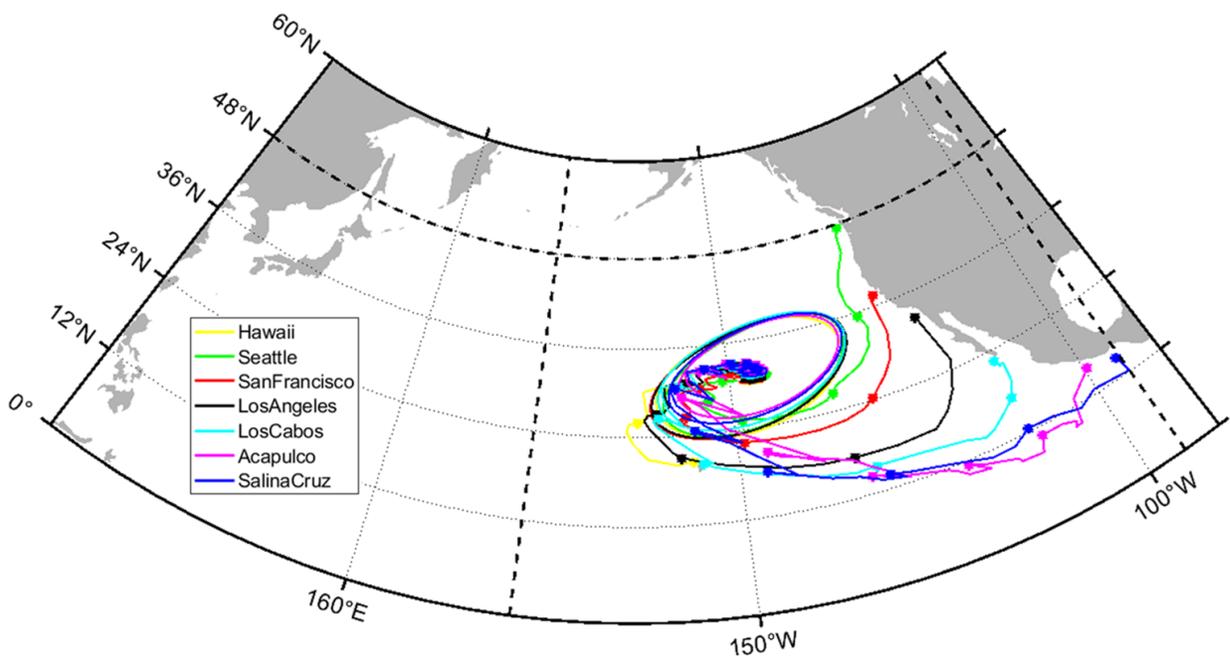


Figura 21. Trayectorias de los centros de masa de las descargas instantáneas en diferentes ciudades de América (líneas de colores), dentro del subdominio de la isla de basura (líneas continuas), durante 30 años. Cada punto en las trayectorias indica un año.

La Figura 21 nos muestra la ruta que siguen las concentraciones desde las diferentes fuentes puntuales durante 30 años, así como sus correspondientes elipses de dispersión. Observamos que a la postre todos los centros de masa convergen inde-

pendientemente del sitio de descarga. Este punto geográfico al este del OPN, donde el material descargado de todos los sitios arriba y converge, proponemos que define la posición del centro de masa de la isla de basura. Otra característica que comparten los sitios de descarga es la orientación promedio suroeste-noreste de las elipses de dispersión. Estas elipses son más parecidas en el extremo noreste que en el suroeste, y aunque su tamaño es parecido no son exactamente iguales.

De manera general, las trayectorias tienen una evolución similar entre las localidades, permitiéndonos identificar cuatro momentos: (i) los centros de masa tienden a moverse rápidamente hacia el sur paralelamente a la costa, (ii) se desplazan hacia el oeste hasta una zona entre los 150° W- 170° W, y después (iii) retornan en sentido noreste hasta (iv) arribar a la isla de basura. Las ciudades cercanas a la frontera sur del OPN presentaron trayectorias de centros de masa más irregulares, debido a que en esta frontera la masa varía su entrada y salida en función de la Corriente Norecuatorial y los vientos Tehuanos, los cuales se intensifican en invierno.

Para investigar si el bimestre de inicio tiene alguna influencia en el resultado anterior, se repitieron todos los experimentos comenzando la iteración con las matrices de los diferentes bimestres para cada localidad. El objetivo es observar si hay cambios significativos en la posición o en los trayectos hacia la isla de basura. La Figura 22 muestra las seis trayectorias de las elipses de dispersión para cada fuente puntual iniciando en diferente bimestre. De manera general, el recorrido se mantiene similar para todas las localidades y la zona de arribo es la misma. El único caso excepcional es el de la dispersión desde Seattle en el bimestre noviembre-diciembre, la cual se dirige inicialmente hacia el norte. Este aspecto se comentará con mayor detalle en la Sección 4.2. Sin embargo, el resultado general indica que las trayectorias de las descargas costeras en norteamérica convergen en una región en particular.

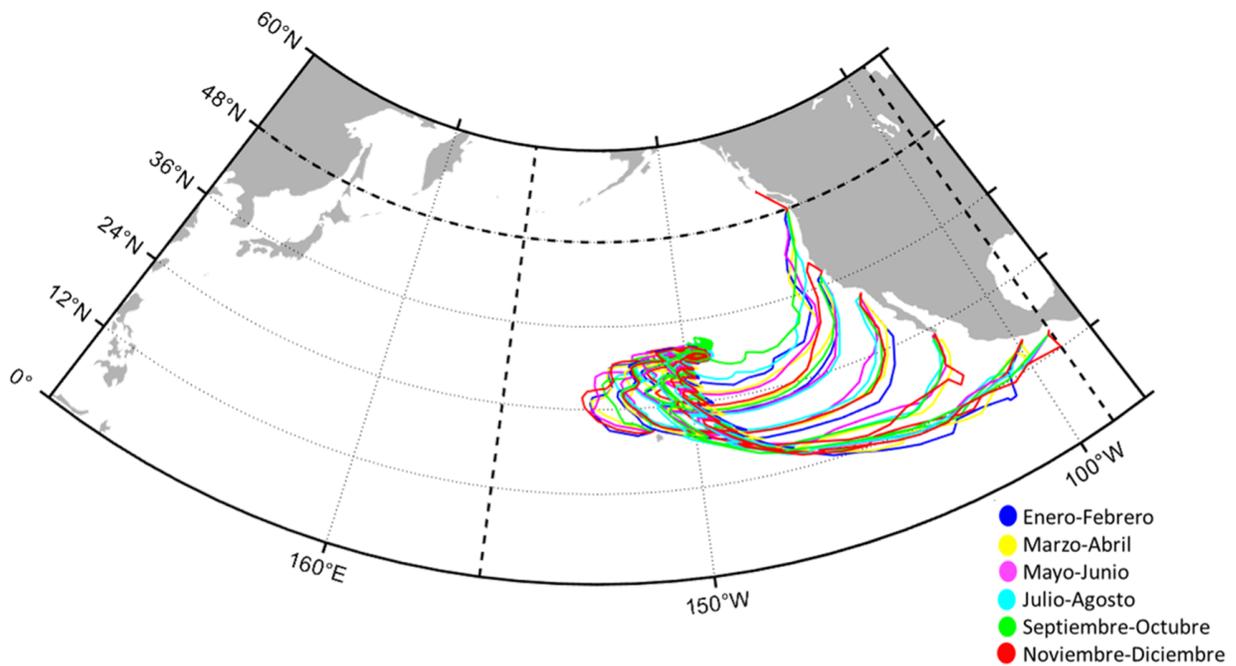


Figura 22. Trayectorias a la isla de basura desde diferentes descargas instantáneas variando su bimestre de descarga.

Después de identificar el comportamiento general, calculamos los tiempos de arribo a la isla de basura para las diferentes localidades. La Figura 23 nos muestra la serie temporal del desplazamiento del centro de masa desde el punto de descarga. En esta figura también podemos ver representadas las cuatro etapas recién descritas. El desplazamiento en todos los sitios presenta un valor pico en los primeros años y después se tiene un comportamiento oscilatorio constante. El incremento del desplazamiento inicial corresponde al momento (i) del desplazamiento al sur y (ii) movimiento al oeste; mientras que la bajada del pico indica (iii) el retorno hacia el este y las oscilaciones constantes corresponden al (iv) arribo a la isla de basura. El tiempo en el que se establece la primera de las oscilaciones regulares lo definimos como el tiempo de arribo, es decir cuando el material vertido en la costa llega a la isla (del orden de ocho años para las localidades en el continente). Estas oscilaciones son anuales y se relacionan con la iteración de las seis matrices bimestrales. Este comportamiento refleja la estacionalidad de la isla de basura del OPN, ya antes mencionada en otros trabajos (por ejemplo, Fischer et al. (2022)). Sin embargo, destaca que la regularidad de las oscilaciones del centro de masa sugiere que la isla de basura es muy estable.

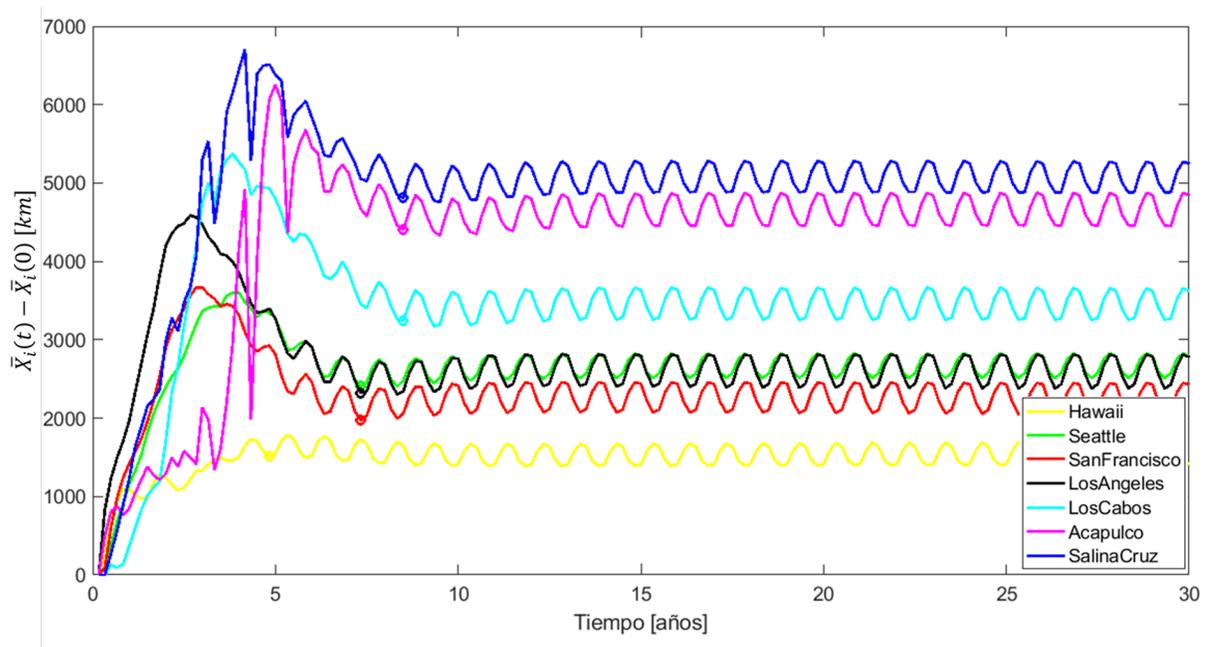


Figura 23. Series de tiempo del desplazamiento del centro de masa desde los puntos de descarga. Los círculos señalan el tiempo de arribo a la región de la isla de basura.

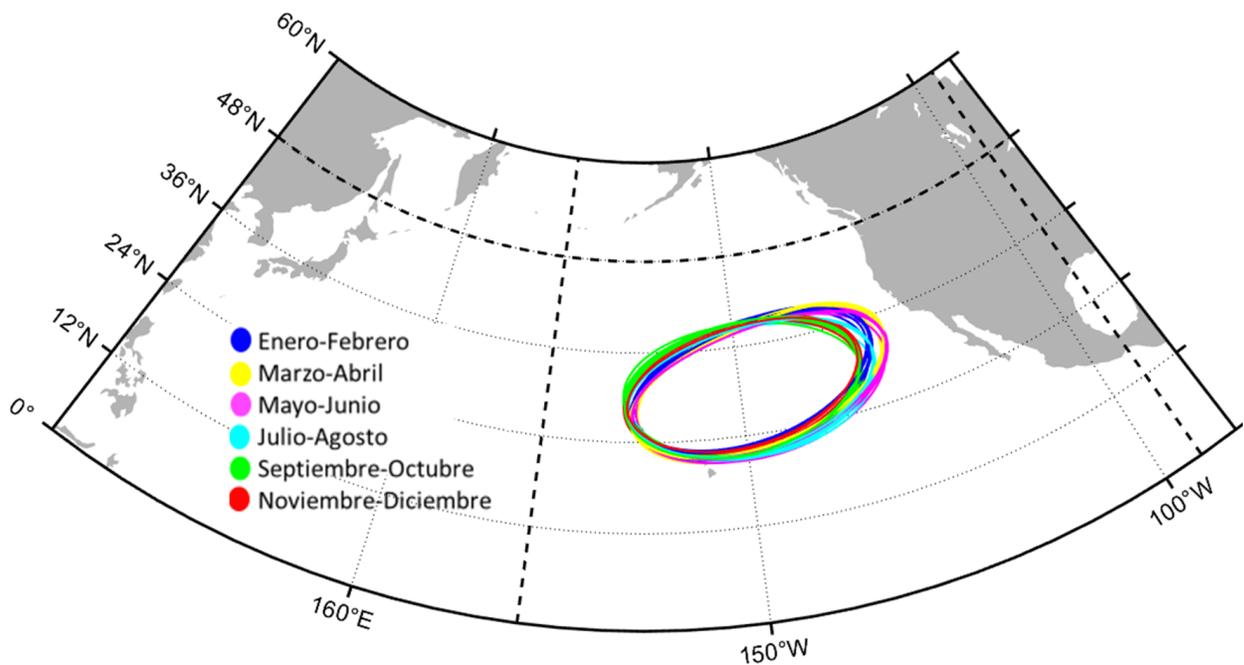


Figura 24. Elipses de dispersión de las diferentes descargas instantáneas unitarias separadas por bimestre final del experimento.

La Figura 24 es otra representación de esta variación bimestral de la isla de basura. En este mapa se grafican las elipses promedio para cada bimestre -desde que se llegó al tiempo de arribo hasta 30 años- de las diferentes localidades. Los resultados indican que la orientación y tamaño de las elipses se ve modificada ligeramente por

las variaciones en el año, independientemente del sitio de descarga. La similitud de las elipses también indica la estabilidad de la isla de basura en el tiempo, es decir, que no pierde material.

Las características de la elipse final calculada para cada localidad después del tiempo de arribo hasta los 30 años se muestran en la Tabla 2. Los tiempos de arribo son de tres tipos: (1) el de Hawaii, el cual es el menor; después le siguen (2) las ciudades más al norte del OPN (Seattle, San Francisco y Los Ángeles), con tiempos intermedios e iguales; y (3) las tres ciudades más al sur del OPN (Los Cabos, Acapulco y Salina Cruz), con tiempos de arribo mayores, y del mismo modo iguales entre sí. La posición del centro de masa fue igual para todos los sitios de descarga, con excepción de Seattle, el cual se encontró un grado más al este que el resto. Los sitios que tuvieron elipses con mayores áreas corresponden a San Francisco, Hawaii y Los Ángeles. La última columna muestra el porcentaje de la concentración inicial unitaria que ha terminado dentro de la elipse de dispersión. La relevancia de este resultado es que indica de manera relativa cuáles son los puntos costeros que aportan más o menos material a la isla de basura. Las ciudades de norteamérica aportaron la mayor acumulación relativa de trazador dentro de sus elipses. Contrario a estas ciudades, Acapulco, Salina Cruz y los Cabos, tuvieron los menores aportes relativos.

Tabla 2. Características del destino de las descargas instantáneas en cada localidad en las simulaciones a 30 años.

Ciudad de descarga	Tiempo de arribo [años]	Centro de masa [$^{\circ}$lon,$^{\circ}$lat]	Área final de la isla [km²]	Trazador acumulado en la isla [%]
Hawaii	4.83	-145, 31	2.94×10^6	33
Seattle	7.3	-144, 31	2.64×10^6	27
San Francisco	7.3	-145, 31	3.00×10^6	34
Los Ángeles	7.3	-145, 31	2.87×10^6	33
Los Cabos	8.5	-145, 31	2.56×10^6	25
Acapulco	8.5	-145, 31	1.96×10^6	15
Salina Cruz	8.5	-145, 31	2.17×10^6	19

3.2. Delimitación de la isla de basura

Con base en los resultados de la sección anterior, definimos a la isla de basura como la elipse de dispersión promedio a partir de los experimentos de descargas puntuales en los siete sitios. La isla de basura calculada de esta forma tiene su centro de masa en -145° de longitud y 31° de latitud, una orientación de 12° respecto a la dirección este y una superficie de $2.59 \times 10^6 \text{ km}^2$, la cual se calculó considerando que sus ejes mayor y menor miden 1415 km y 580 km, respectivamente.

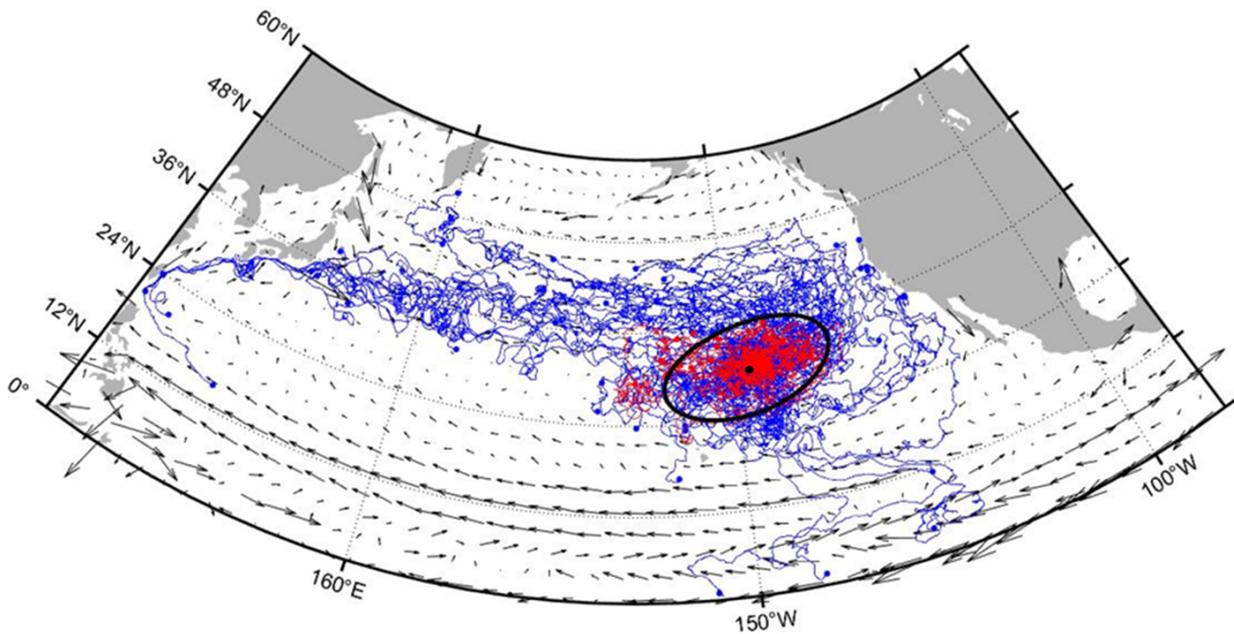


Figura 25. Trayectorias previas (líneas azules) y posteriores (líneas rojas) de los derivadores que atravesaron el centro de masa (punto negro) de la isla de basura promedio (elipse negra), entre los años 1979 y 2020. Las flechas negras indican el campo de velocidad euleriano calculado a partir de las velocidades promedio del conjunto completo de derivadores.

Para determinar si en efecto el centro de masa de la isla aquí calculada es un punto de atracción de los derivadores superficiales, se graficaron las trayectorias de boyas que pasaron por ese bin ($-145^\circ, 31^\circ$) en el periodo registrado (Figura 25). En total, se encontraron 3383 registros de boyas en dicho bin durante los 40 años del PGD. Las trayectorias que corresponden a tiempos antes/después de pasar por el centro de masa (punto negro) se encuentran en color azul/rojo. Lo primero que notamos es que, en efecto, varios de los derivadores lanzados desde diferentes ubicaciones del OPN se dirigen hacia esa región -principalmente los provenientes de las corrientes de Kuroshio, California, y del este ecuatorial. Por el contrario, después de pasar por el

centro de masa de la isla, derivan únicamente en regiones cercanas alrededor de este punto y la mayoría permanecen dentro de la elipse promedio.

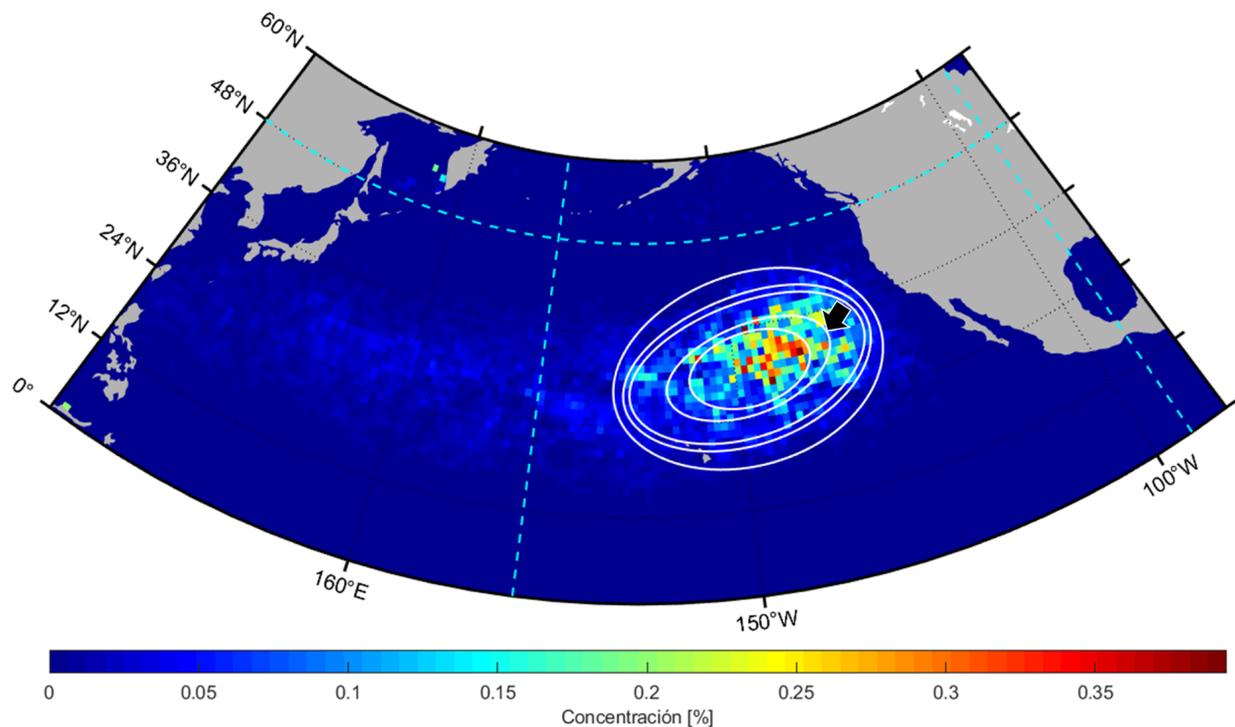


Figura 26. Concentraciones finales para varios experimentos de una descarga instantánea desde el centro de masa del isla de basura (-145°,31°) dentro del dominio delimitado por las líneas punteadas. Las elipses se calculan con diferente límite mínimo de concentración por bin. De adentro hacia afuera: >0.1%, >0.05%, >0.01%, >0.005% y 0.001%, respectivamente.

Con respecto al tamaño de la isla de basura calculada aquí, es importante recordar la condición de mínima concentración por bin elegida de manera arbitraria (>0.05% de la descarga inicial) para ser considerada en el análisis. Para explorar las implicaciones de haber elegido ese valor, se generaron varios experimentos aplicando una descarga puntual desde el centro de masa de la isla de basura estableciendo diferentes mínimos de concentración. Las elipses para cinco valores del umbral de concentración se muestran en la Figura 26. En la Tabla 3 se presentan la superficie y el porcentaje relativo del trazador que se acumula después de 10 años en cada una de estas elipses. Por supuesto, conforme el límite sea menor la elipse es mayor y contiene un porcentaje más elevado de la descarga inicial. En la sección de discusiones se abundará más sobre las ventajas y desventajas del límite que se escoja. Observemos que si consideramos una concentración límite muy pequeña, la acumulación dentro de la isla de basura incrementa notablemente; lo que indica la estela de concentraciones menores alrededor de la isla.

Tabla 3. Variaciones de área y masa dentro de la elipse de dispersión para diferentes valores de concentraciones mínimas (ver Figura 26).

Límite de concentración [%]	Área [km ²]	Masa [%]
0.1	1.7846x10 ⁶	20.2228
0.05	2.9905x10 ⁶	33.5989
0.01	6.4021x10 ⁶	54.5648
0.005	7.5039x10 ⁶	58.6726
0.001	1.0337x10 ⁷	64.2881

3.3. Contribución de descargas continuas

Una vez delimitada la isla de basura, ahora la utilizamos para hacer nuevos análisis de descargas puntuales en Norteamérica. Este conjunto de experimentos busca entender cómo varía el aporte de las localidades cuando las descargas son continuas. Para esto iteramos las seis matrices de transición durante diez años manteniendo una descarga unitaria para cada tiempo en el sitio bajo estudio, de modo que el vertido de material es continuo. En esta ocasión, nuestra variable de interés es el porcentaje de la descarga total que se acumula en la isla de basura. Por la naturaleza del experimento las concentraciones cambian en el tiempo, tanto la vertida al océano como la contenida en la elipse de referencia.

La Figura 27 muestra las series de tiempo del porcentaje de concentración contenido en la isla de basura para los siete sitios de interés. Como ejemplo, también se muestra el mapa con la isla de basura definida por la elipse promedio y la distribución de concentraciones vertidas desde Los Ángeles a los diez años. Las curvas comienzan en cero porque al inicio la concentración es nula dentro de la elipse, y posteriormente crecen en forma casi lineal conforme los trazadores arriban a la isla de basura. Los resultados de estos experimentos mantienen casi igual el orden de aporte relativo de las localidades que en los experimentos de descargas puntuales (lo cual se observa al comparar el orden final de las curvas con el orden de los valores de la última columna en la Tabla 2). La diferencia es que en esta ocasión Hawaii es el de mayor aporte, en lugar de San Francisco. Además, todos los sitios mostraron porcentajes de acumulación relativos ligeramente menores a los presentados en las descargas de tipo instantáneo. Las descargas continuas solo se llevaron a cabo por diez años. Durante este tiempo, la

tendencia de todos los sitios fue la de llenar la elipse hasta una concentración relativa aparentemente en equilibrio. Sin embargo, no sabemos si este equilibrio es estable o no, pues eso depende de si el comportamiento del llenado de la isla cambia para tiempos de exposición mayores.

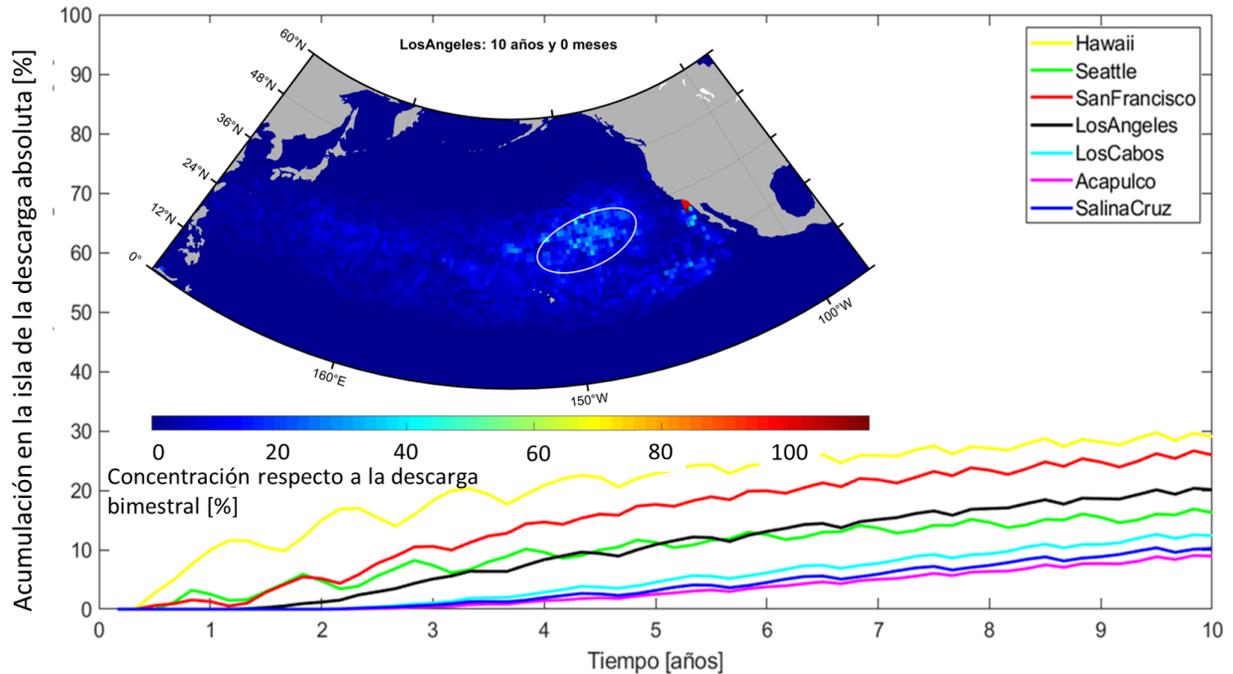


Figura 27. Series de tiempo de la concentración absoluta acumulada en la isla de basura después de descargas continuas de diez años desde las diferentes localidades. En el mapa, las concentraciones relativas a partir de una descarga continua desde los Ángeles vertida cada bimestre durante diez años.

3.4. Variación bimestral de la isla

La última serie de experimentos explora la dispersión de una descarga instantánea en función del bimestre del año utilizado para iterar las matrices. La construcción de estos experimentos consistió en utilizar solo una matriz de transición en las iteraciones, con lo cual se busca representar la dinámica de cada bimestre. Cada experimento sigue la evolución de una descarga desde el centro de masa del isla de basura definido anteriormente durante 30 años.

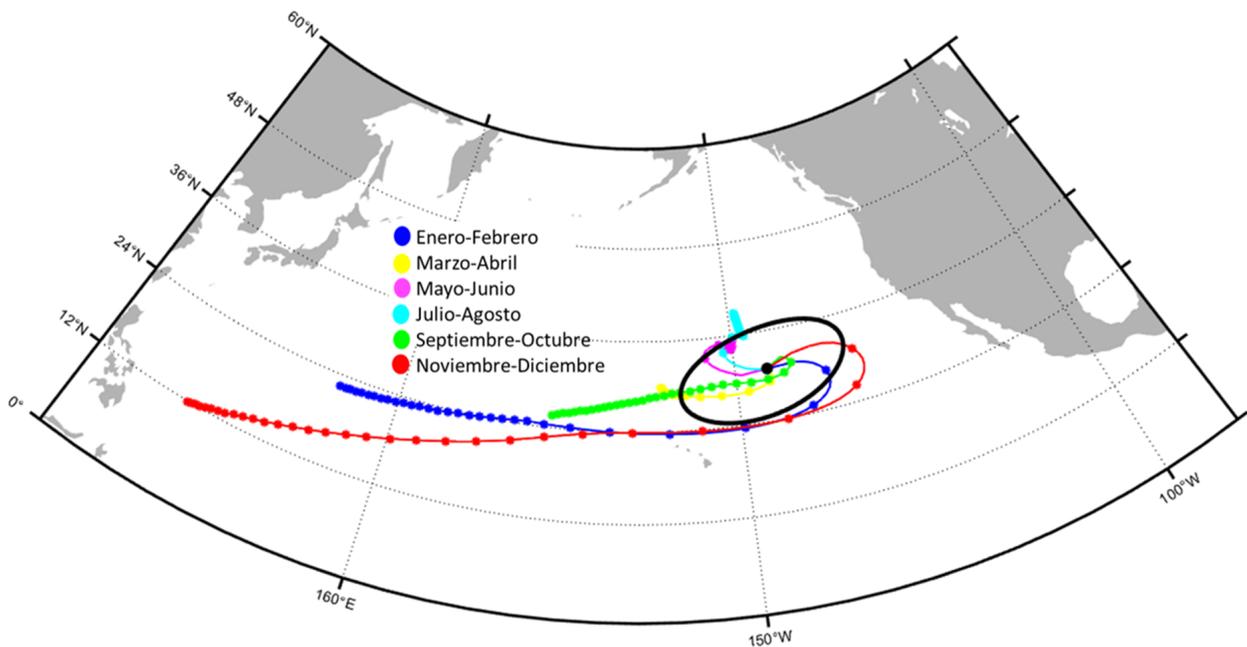


Figura 28. Trayectorias del centro de masa en 30 años calculadas en experimentos estadísticos con matrices de probabilidad constantes por bimestre. Cada punto indica un año. La descarga instantánea es desde el centro de masa de la isla de basura ($-145^{\circ}, 31^{\circ}$). La elipse negra es la isla de basura aquí calculada.

La Figura 28 presenta las seis trayectorias del centro de masa calculadas con cada matriz bimestral. De manera general observamos que en conjunto la mayoría de las trayectorias mantienen el giro anticiclónico característico de la zona de convergencia de desechos. De ahí, es posible distinguir tres comportamientos: (i) los de alta retención en los meses de verano (mayo-agosto), periodo en el que el centro de masa se mantiene cerca del origen; (ii) los estados transitorios en los meses de marzo-abril (primavera) y septiembre-octubre (otoño), que muestran un desplazamiento moderado hacia el oeste y (iii) los bimestres de alta dispersión, que inicialmente se desplazan al este y luego notoriamente hacia el oeste, correspondientes a invierno (noviembre-febrero). Es importante resaltar que en algunos bimestres (principalmente en invierno) los centros de masa salen y se alejan de la elipse de referencia, lo que indica que la tendencia de los desechos marinos es a dispersarse fuera de la isla de basura. Si bien las trayectorias de mayo-junio y julio-agosto también salen de la elipse de referencia, se puede observar que se estacionan en una región cercana a la periferia.

Para entender las diferencias anteriores, la Figura 29 muestra las trayectorias de los experimentos por separado y la climatología bimestral del viento y la presión atmosférica a nivel del mar obtenidas del reanálisis ERA5 (Copernicus, 2021b). Los dos

rasgos dominantes son el anticiclón en la parte este del OPN, el cual se desplaza al norte y se intensifica en los meses de verano, y el giro subpolar ciclónico de las Aleutianas, que predomina en invierno y casi desaparece en verano. La razón de comparar nuestros resultados con estos forzadores atmosféricos es debido a que la deriva de Ekman se relaciona directamente con el viento en superficie y en consecuencia con los cambios de presión atmosférica a nivel del mar. Se debe recordar que la deriva de Ekman en superficie es uno de los mecanismos que generan la acumulación de desechos del OPN (Kubota, 1994; Maximenko et al., 2012). Como referencia de la isla de basura delimitada anteriormente, en cada mapa se incluye las elipses promedio de cada bimestre mostradas en la Figura 24.

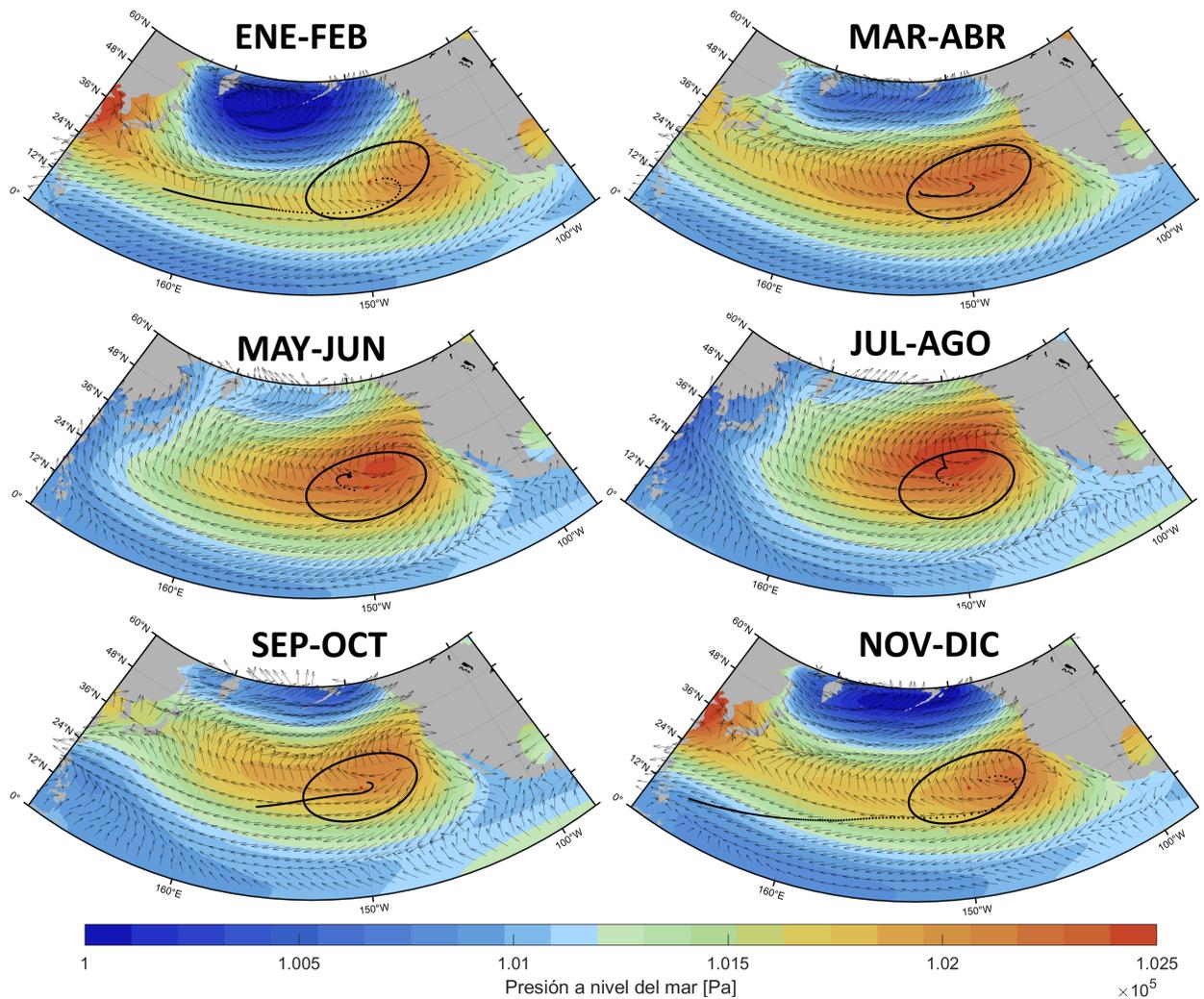


Figura 29. Trayectorias del centro de masa de 30 años para experimentos numéricos con matrices de probabilidad constantes por bimestre, desde el centro de masa de la isla de basura. Los colores de fondo indican la presión a nivel del mar, mientras las flechas representan la dirección del esfuerzo del viento. Al mismo tiempo, se señalan la posición promedio de la isla de basura de cada bimestre (elipse negra) y su centro de masa inicial (cruz roja).

Podemos observar que cuando se hace la iteración con los bimestres de verano (mayo-junio y julio-agosto) la trayectoria del centro de masa se desplaza al norte, siguiendo a la alta presión atmosférica. Este comportamiento se puede asociar con la intensificación del anticiclón atmosférico durante el verano, lo cual incrementa la deriva de Ekman y, en consecuencia, la convergencia y la retención de desechos dentro de la isla. Para el caso de los bimestres de invierno (noviembre-diciembre y enero-febrero) el giro subpolar toma mayor fuerza, alimentado por las bajas temperaturas, mientras que la alta presión se desplaza al sureste y se debilita. Esta combinación provoca que las trayectorias sean atraídas hacia el este en un principio, y después fuertemente advectadas hacia el oeste hasta el continente asiático por la acción de los vientos alisios. Además de por sus trayectorias, podemos observar la relación de la presión atmosférica con la isla de basura, en las orientaciones de las elipses de dispersión. La orientación de las elipses de dispersión parece seguir a la orientación del centro de alta presión. En consecuencia, tenemos mayores pendientes en los meses de invierno, respecto a los meses de verano.

Capítulo 4. Discusiones

4.1. El camino de Norte América a la isla de basura

Las trayectorias de las descargas vertidas en los sitios de Norteamérica tienen un patrón general de cuatro etapas: inicialmente se mueven en dirección sur paralelo a la costa, después siguen una intensa deriva al oeste, más tarde retornan en dirección noreste y finalmente arriban a la región de la isla de basura (Figura 21). Si consideramos las corrientes principales del giro subtropical notaremos que algunas de estas etapas coinciden con ellas. Primeramente, en el norte se tiene el desplazamiento hacia el sur paralelo a la costa y siguiendo a la Corriente de California. Posteriormente, las concentraciones se desvían en dirección oeste cerca de los diez grados, siguiendo a la Corriente Norecuatorial. En un tercer momento, el retorno hacia la zona este del OPN se hace a la altura de la zona de convergencia subtropical. Por último, cerca del centro de alta presión atmosférica de la región este del OPN, tendremos el arribo a la isla de basura. Las ciudades más al sur se dirigen desde el principio hacia el oeste y convergen en el mismo sitio.

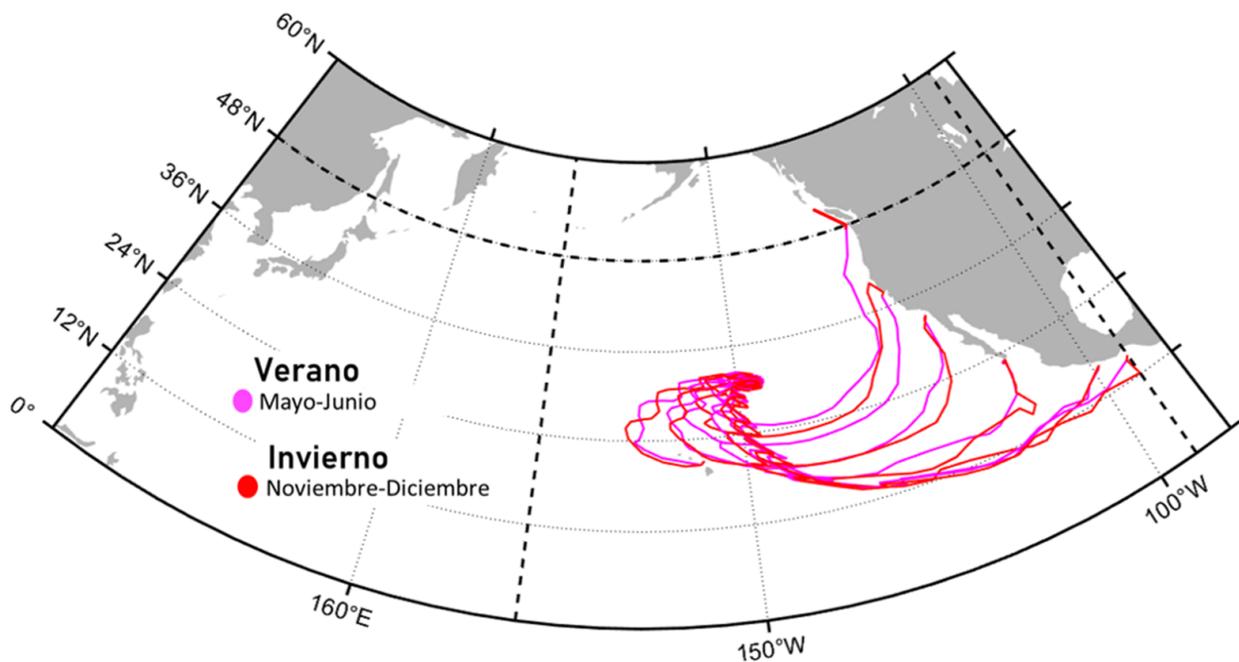


Figura 30. Trayectorias a la isla de basura desde diferentes descargas instantánea desde Norte América para los bimestres de noviembre-diciembre y mayo-junio.

En la Sección 3.1 se encontró que las trayectorias y características de las elipses

que definen a la isla de basura no varían en forma significativa cuando los experimentos inician en bimestres diferentes (Figura 22). Los cambios más sobresalientes ocurren al inicio de la descarga de noviembre-diciembre en las localidades ubicadas más al norte, Seattle y San Francisco. Para ilustrar más claramente esta diferencia, la Figura 30 muestra las trayectorias de meses de invierno y verano. En efecto, las descargas ubicadas a mayor latitud se dirigen inicialmente hacia el norte (sur) en invierno (verano). Este comportamiento lo relacionamos con la intensificación de la corriente de California en verano, misma que se puede observar en las corrientes geostóficas obtenidas por altimetría (Figura 31). Otro efecto estacional menos visible, se encuentra en la frontera sur para el caso de Salina Cruz, cuya descarga tiene una dirección preferencial hacia el sur, consecuencia de los vientos del Norte y la interacción con la Cotracorriente Ecuatorial en invierno (Figura 32).

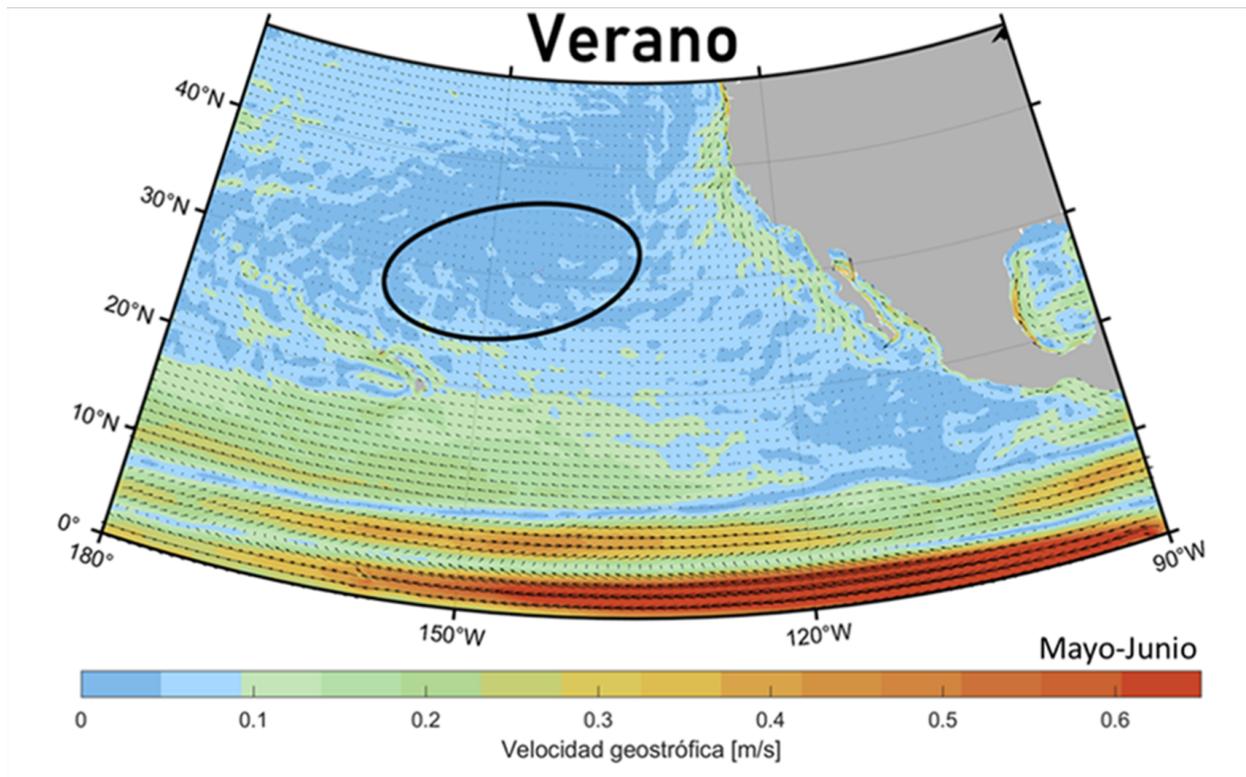


Figura 31. Corrientes geostóficas promedio calculadas con altimetría satelital (Copernicus, 2021a) para el bimestre de verano (mayo-junio) entre 1993 y 2020. En color negro se muestra la elipse de dispersión calculada en la sección 3.2 que denota la isla de basura para la región este del OPN.

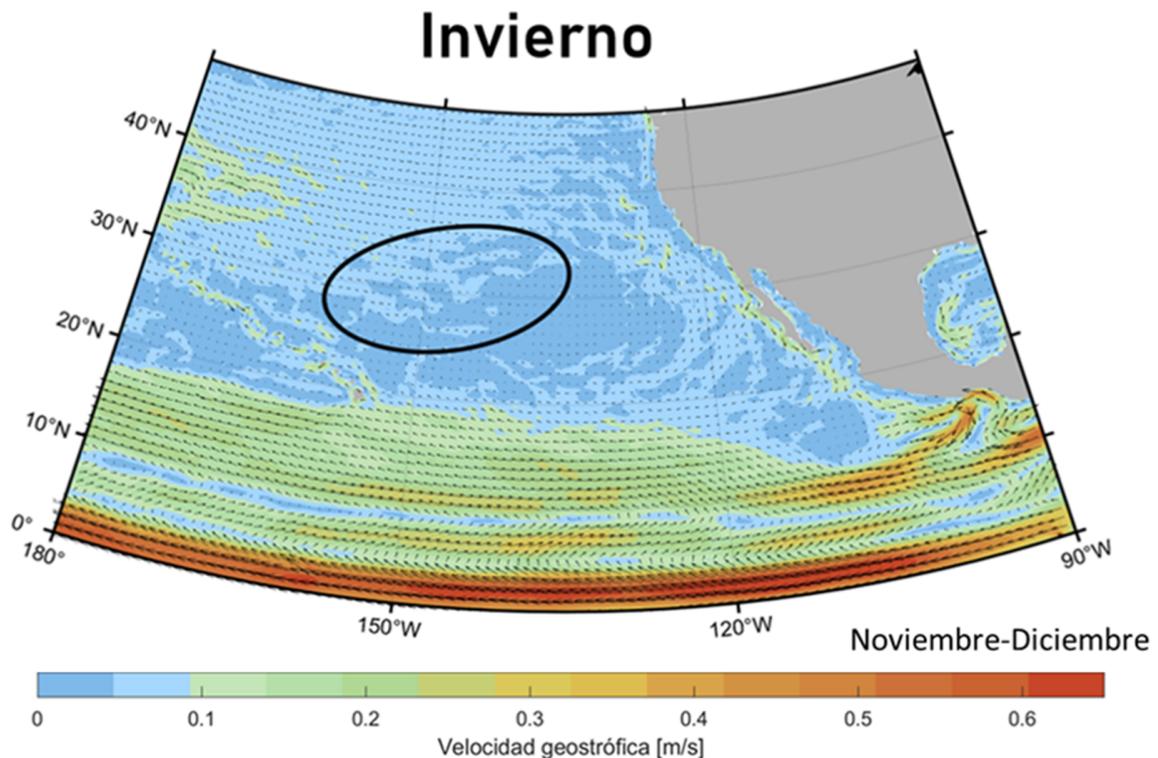


Figura 32. Corrientes geostroficadas calculadas de la misma forma que en la Figura 31 pero para el bimestre de invierno (noviembre-diciembre) entre 1993 y 2020.

4.2. Seattle: un caso particular

La descarga en Seattle es un caso particular debido a que en cualquier época del año una fracción del material vertido se traslada al norte, aún cuando la mayor parte derive hacia la isla de basura. La dirección al norte es preferencial en invierno, cuando la bifurcación de la corriente de Alaska es más intensa en la Corriente del Pacífico Norte. Este comportamiento se ilustra en la Figura 33, la cual muestra la evolución de las concentraciones para cuatro tiempos. El movimiento inicial hacia el norte genera la presencia de trazadores en el Golfo de Alaska a los 3 años. El material que llega a este sitio no conforma una isla estable de basura porque se pierde en años posteriores. En efecto, el trazador que va al norte escapa hacia el oeste y nunca ingresa a la isla de basura del OPN.

Requerimos señalar que justo en la región noroeste del OPN -hacia donde se dirige el material después de transitar por el Golfo de Alaska- es donde los registros de boyas disminuyen y las matrices de transición podrían presentar valores espurios. Si

bien esto no tiene implicaciones en nuestros resultados sobre la ruta del centro de masa en dirección a la isla, notamos que posiblemente genere consecuencias en la contribución relativa de Seattle.

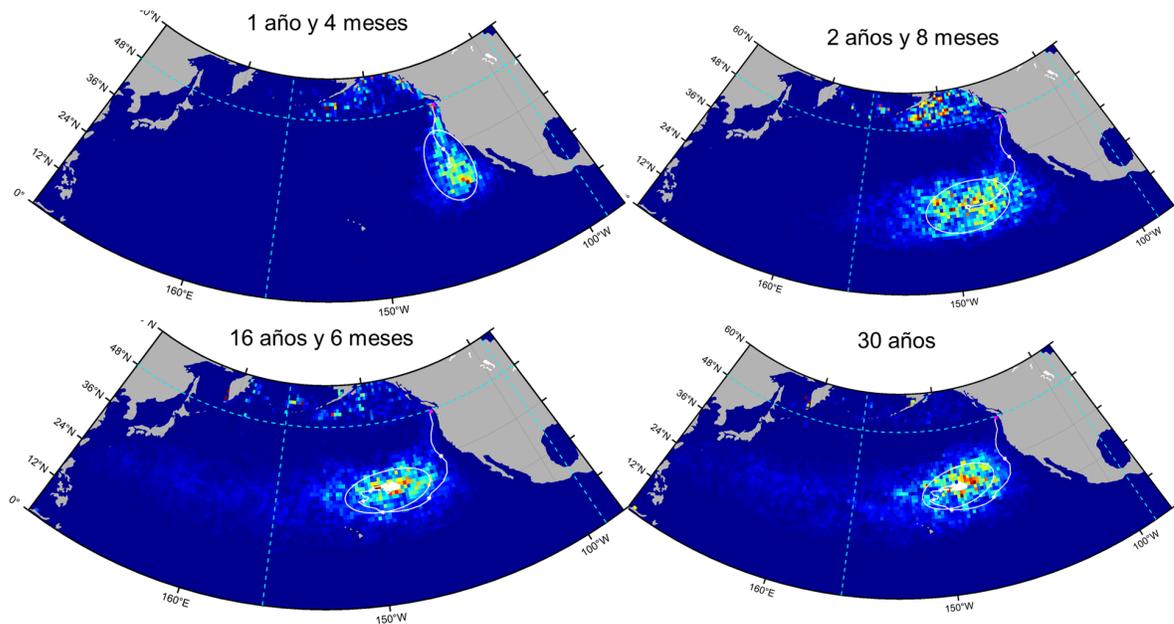


Figura 33. Trayectoria del centro de masa de la isla de basura (línea blanca) para una descarga instantánea desde la ciudad de Seattle (punto magenta) durante 30 años. Cada punto blanco indica un año.

4.3. Lo que sabemos de la isla

Debido a que las elipses de dispersión: (i) terminaron en una región específica, (ii) de tamaño y orientación similar, y (iii) permanecieron semi-estacionarias varios años, entonces definimos una elipse promedio para caracterizar a la isla de basura. Esta elipse tiene su centro de masa en -145° de longitud y 31° de latitud, una orientación de 12° respecto a la dirección este y una superficie de $2.59 \times 10^6 \text{ km}^2$. Por otro lado, usando sus propias matrices de transición, Maximenko et al. (2012) calcularon el centro de masa de la isla de basura del OPN en -139° , 31° , con una orientación de 11.2° y superficie de $3.07 \times 10^6 \text{ km}^2$. Con base en sus mediciones de plásticos superficiales en el OPN, Lebreton et al. (2018) estimaron una superficie de $1.6 \times 10^6 \text{ km}^2$.

Uno de los resultados fundamentales de esta investigación es la diferencia del porcentaje de material vertido que termina en la isla de basura dependiendo del sitio de descarga en Norteamérica (última columna de la Tabla 2). Dicho porcentaje fue mayor en regiones más al norte del OPN (Seattle, San Francisco y Los Ángeles), con respecto

a aquellas que se encuentran más cercanas al ecuador (Los Cabos, Acapulco y Salina Cruz).

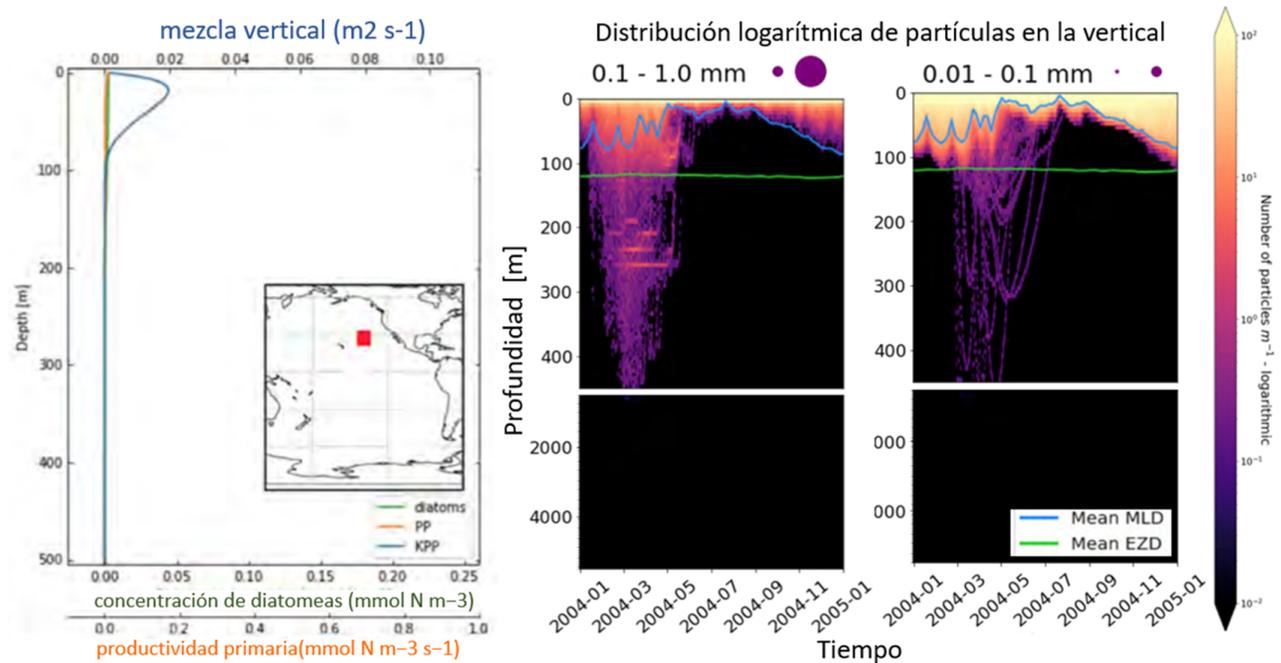


Figura 34. Distribución vertical anual de partículas en la isla de basura del OPN (Fischer et al., 2022). Panel izquierdo: ubicación de la zona de estudio y distribución vertical de algunas variables físico-biológicas. Paneles derechos: distribución vertical de partículas durante un año.

En la Sección 3.4 presentamos experimentos en los que las descargas instantáneas partieron del centro de la elipse promedio y fueron iteradas con una sola matriz, en lugar de usar las seis matrices bimestrales. Los resultados arrojaron que el centro de masa se mantiene cerca del punto de descarga cuando se itera con las matrices de verano, pero se aleja rápidamente hacia el oeste si se itera con las matrices de invierno (Figura 28). Con base en los mapas climatológicos de variables atmosféricas (Figura 29), concluimos que este comportamiento se relaciona con los cambios estacionales del patrón de vientos y presiones sobre el OPN. Otro estudio donde también se ha reportado la variación estacional de la capacidad atractora de la isla de basura del OPN es el de Fischer et al. (2022), donde se modelaron las distribuciones verticales de partículas de diferentes tamaños tomando en cuenta los efectos del viento superficial (Figura 34). Los autores encontraron que en primavera-verano se da en mayor medida el hundimiento de micro plásticos dentro de la isla de basura. La relación de esto último con nuestro resultado referente a que primavera-verano es la época de mayor retención superficial queda como una cuestión abierta.

4.4. ¿A dónde va lo que no va a la isla?

Cabe ahora preguntarse qué sucedió con el material descargado que no fue retenido por la isla de basura. Para discutir esta cuestión se calculó la descarga inicial en cuatro diferentes reservorios: (i) dentro de la elipse promedio, (ii) fuera de la elipse pero dentro del subdominio usado para realizar los cálculos de dispersión, (iii) fuera de dicho subdominio pero dentro del OPN, y (iv) fuera del OPN (Figura 35). En los diagramas observamos que más de la mitad de la descarga vertida en la mayoría de las localidades se acumula en la isla y sus regiones aledañas, con excepción de las dos ciudades más al sur. Para el caso de las descargas de Acapulco y Salina Cruz, cerca de la mitad de su trazador sale del OPN y otra pequeña parte se queda en la zona de acumulación subtropical oeste. Para saber a dónde se dirigen los desechos que no arriban a la isla vamos a revisar los casos de las localidades más al sur y al norte.

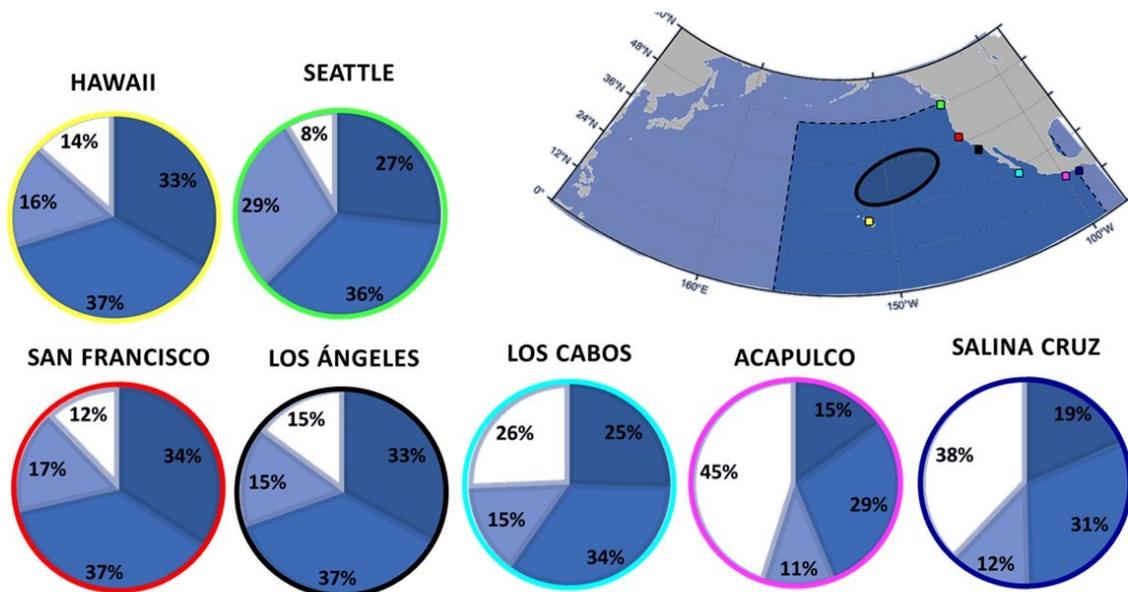


Figura 35. Reparto porcentual de la masa de la descarga inicial después de 30 años. Los tonos de las fracciones azules indican las zonas de acumulación dentro del OPN, mientras que la fracción de color blanco representa el porcentaje de la descarga inicial que sale del OPN. El color de los círculos indica la ubicación de la descarga.

La Figura 36 presenta un mapa ampliado con las concentraciones después de 30 años de haber ocurrido la descarga instantánea en Salina Cruz. Se puede apreciar que la materia dentro del OPN se queda principalmente en la isla de basura, alrededor de

la isla y en la zona de convergencia subtropical. Por fuera del OPN, el trazador sale por la frontera sur y este, para posteriormente acumularse en tres zonas principales: (1) cerca de Indonesia, donde el trazador ingresa desde el oeste de la zona de convergencia subtropical, (2) al norte de Australia, proveniente de la Corriente Ecuatorial del Sur y (3) en la isla de basura del Océano Pacífico Sur. Mediante las animaciones de estos experimentos se encontró que la ruta hacia este último sitio fue la siguiente: el trazador viaja primero en (i) la Corriente Ecuatorial del Sur, posteriormente llega a la (ii) Corriente de Australia y comienza a desplazarse a través de la (iii) zona de convergencia del giro subtropical sur para finalmente (iv) arribar a la isla de basura del hemisferio sur.

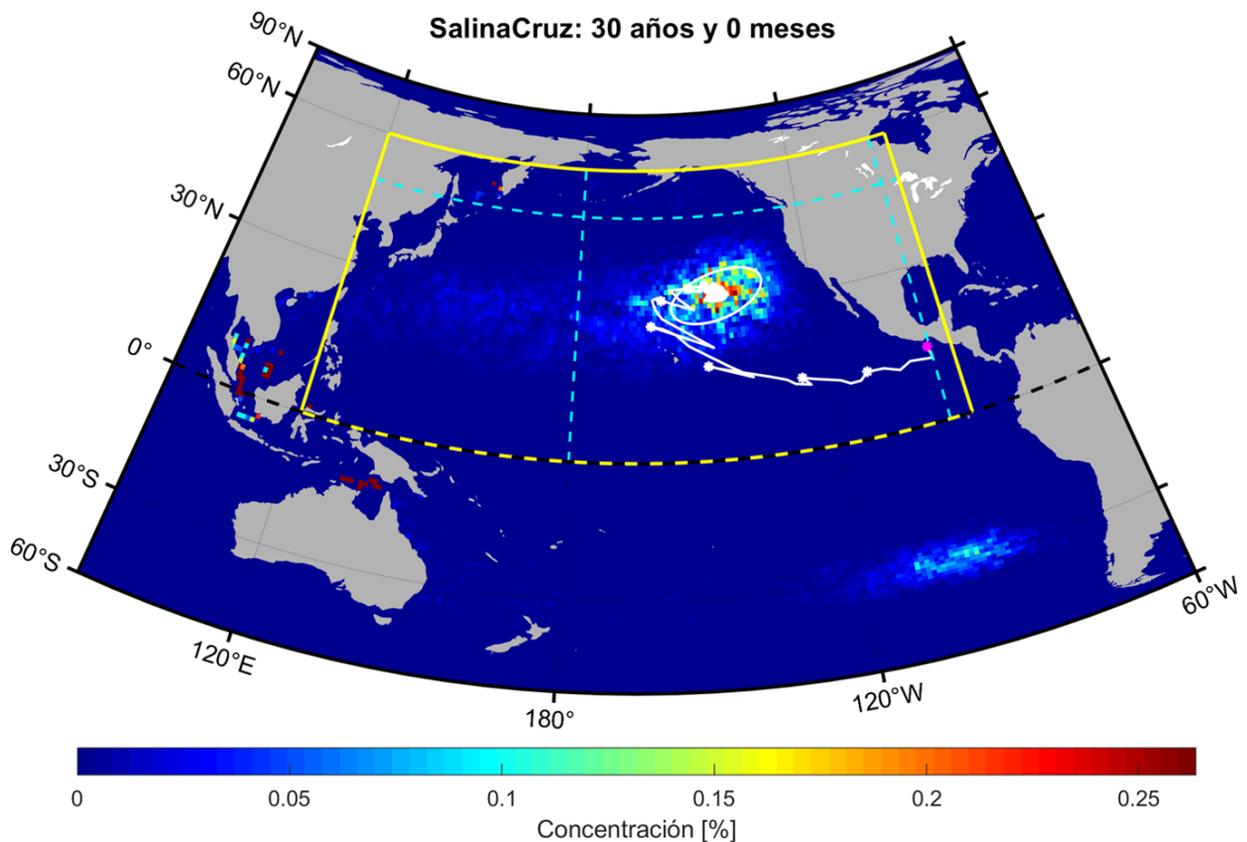


Figura 36. Ampliación del dominio para el experimento de descarga instantánea desde Salina Cruz después de 30 años. En amarillo se ve el dominio original del OPN, en negro se señala el ecuador y en cian discontinuo el subdominio este del OPN.

La Figura 37 muestra el mapa ampliado para la descarga iniciada en Seattle. En el norte, el trazador se dirige al Golfo de Alaska, para posteriormente acumularse en la costa noroeste del OPN, área señalada con un recuadro rojo. La única parte del trazador de la descarga de Seattle que sale del OPN corresponde a la que se

dirige a la zona de convergencia subtropical y después sale por la frontera oeste. Después, este trazador se acumula cerca de las islas de Indonesia. Los bins de alta concentración observados en estas dos últimas figuras pueden reflejar problemas de falta de registros en esas zonas, como se discute más abajo.

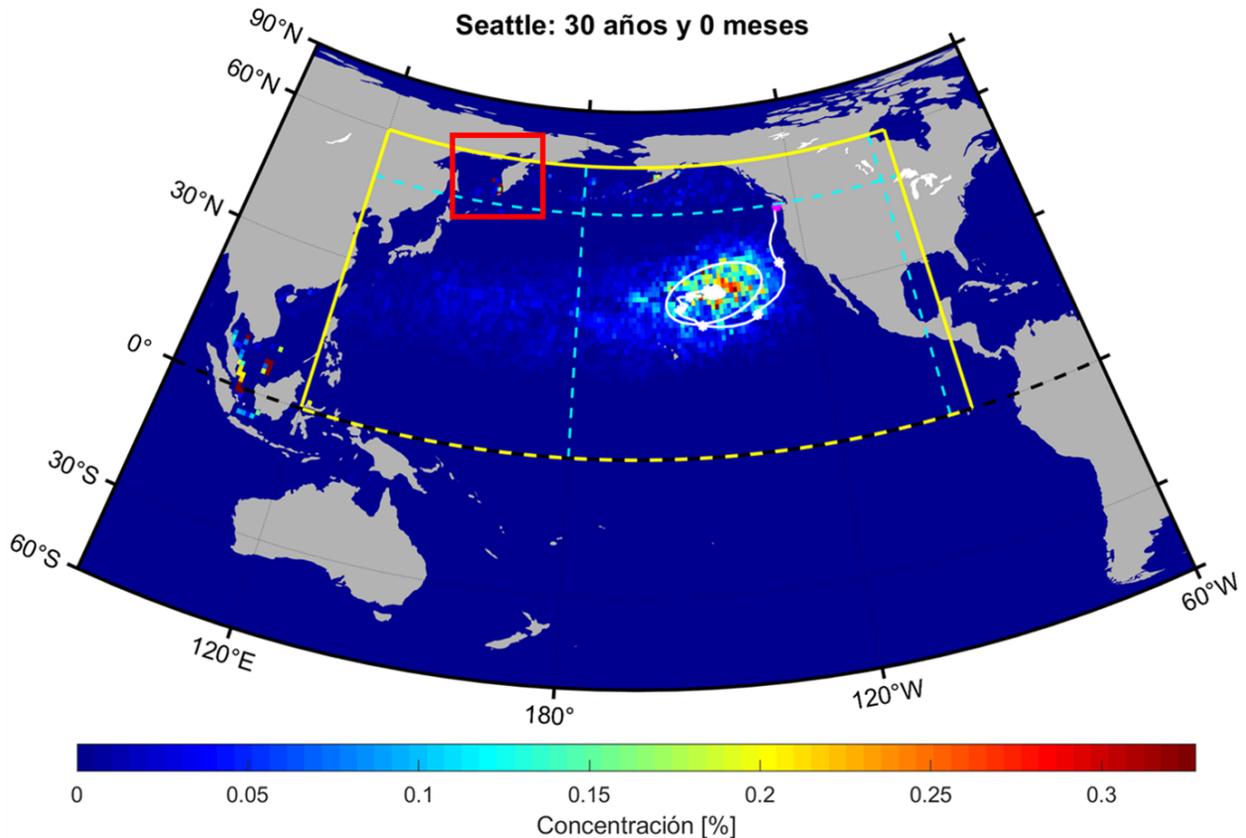


Figura 37. Ampliación del dominio para el experimento de descarga instantánea desde Seattle después de 30 años. En amarillo se ve el dominio original del OPN, en negro se señala el ecuador y en cian discontinuo el subdominio este del OPN. El cuadro rojo marca la zona de mayor acumulación.

4.5. Efecto del lastre en derivadores

Se debe recordar que las matrices de transición que hemos utilizado combinan trayectorias de boyas con (52%) y sin (48%) lastre (Van Sebille et al., 2012). En consecuencia, el presente estudio representa de manera combinada la dispersión en superficie (boyas sin lastre) y en la capa de mezcla (boyas con lastre). Aunque los derivadores sin lastre se agregan en gran medida en la misma región que los derivadores con lastre, su dinámica difiere principalmente en:

- Sin lastre: las boyas son más sensibles a efectos superficiales generados directa o indirectamente por el esfuerzo del viento y el oleaje como la deriva de Stokes

(Ríos, 2021), la deriva de Ekman (Maximenko et al., 2012) y efectos inerciales (Beron-Vera et al., 2016).

- Con lastre: los trazadores siguen el flujo del océano en la capa de mezcla. Son una buena representación dinámica de la superficie geostrófica y el transporte de Ekman (Maximenko et al., 2012).

Es importante señalar que siempre que tengamos suficientes registros de derivadores podremos recalculamos las matrices de transición en función del fenómeno a analizar (p. ej. ENSO: El Niño, la Niña y la fase normal). Mediante la generación de matrices de transición robustas basadas en derivadores con lastre y sin lastre se puede tener una mayor claridad para separar procesos que ocurren en los primeros metros del océano. Por ejemplo, se podría discernir con mayor certeza el movimiento por corrientes geostróficas de los efectos derivados del viento. Consideramos que esta variación en la construcción de las matrices -separando los registros con y sin lastre- se podría enriquecer si se incorpora el efecto probable de diferentes forzadores a partir de parametrizaciones estadísticas (p. ej. la deriva de Stokes).

4.6. El problema de los pocos registros

Tener pocos registros en una herramienta estadística incrementa los errores. Si bien la cantidad de derivadores superficiales usados para la construcción de las matrices que aquí utilizamos tiene una cobertura casi total en el OPN, aún existen zonas con una baja o nula cantidad de datos, especialmente en algunas regiones en el oeste (Figura 38). La falta de registros puede significar la asignación de probabilidades espurias en partes de las matrices de transición. En particular, se podría generar acumulación excesiva en algunos bins, los cuales corresponden a sitios con pocos registros (como parece suceder en los casos de las Figuras 36 y 37).

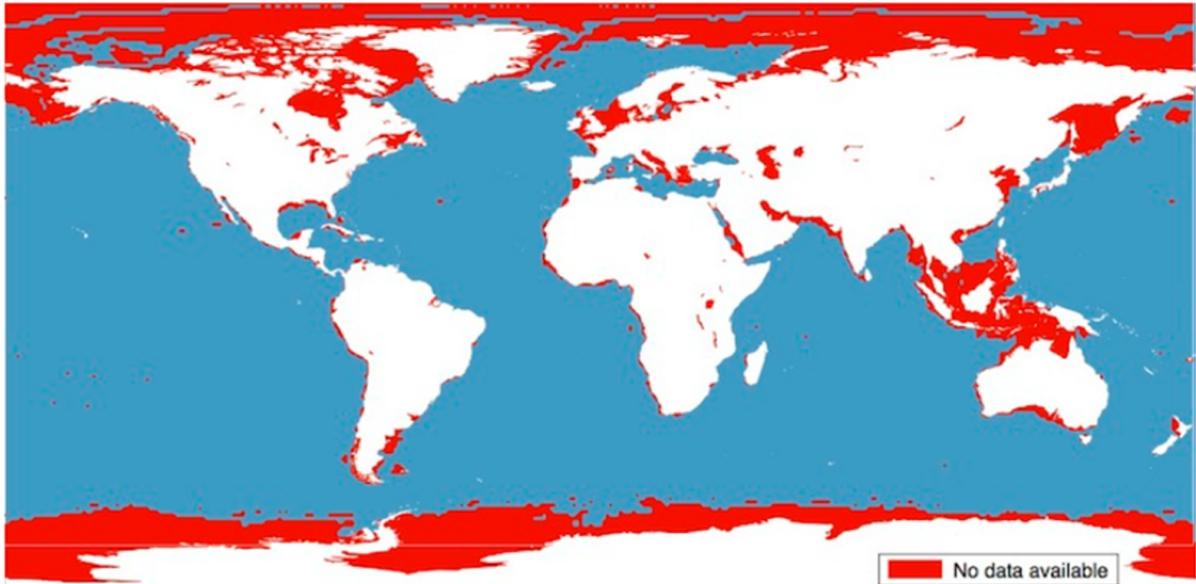


Figura 38. Sitios sin datos de la matriz de transición obtenidos de plasticadrift.org

Una manera de filtrar el efecto de los pocos registros fue con la generación del subdominio $[-240^\circ, -90^\circ; 0^\circ, 60^\circ]$ para el cálculo de las elipses de dispersión en el seguimiento a la isla de basura (ver Sección 2.4). La Figura 39 muestra dos experimentos en los que no se utilizó un subdominio (columna izquierda) y los mismos casos en los que se utilizó el subdominio mencionado (columna derecha). La primera fila ilustra el efecto del límite oeste (casos A1 y A2) a partir de la descarga instantánea de Salina Cruz. Si no se considera dicho límite la elipse resultante se alarga zonalmente debido a que el cálculo incluye las concentraciones en el oeste, y en particular la acumulación en un bin cercano a Indonesia (recuadro rojo en A1). En cambio, al usar el límite podemos registrar claramente la isla de basura en la parte este (A2).

Por otro lado, la segunda fila presenta un ejemplo en el que se ilustra el efecto del límite norte en la descarga de Seattle (casos B1 y B2). Sin el límite, la elipse se expande debido a la acumulación espuria en la región noroeste del OPN -hacia donde se dirige el material después de el Golfo de Alaska-. En consecuencia, la contribución relativa de Seattle a la isla de basura, así como la concentración en el subdominio este, se ven disminuidas. Por el contrario, al considerar el límite podemos registrar con claridad la isla de basura. Resumiendo, creemos que establecer una manera de pesaje de confiabilidad de los datos en función del número de registros con el que se calculan las probabilidades sería una buena manera de disminuir esta problemática.

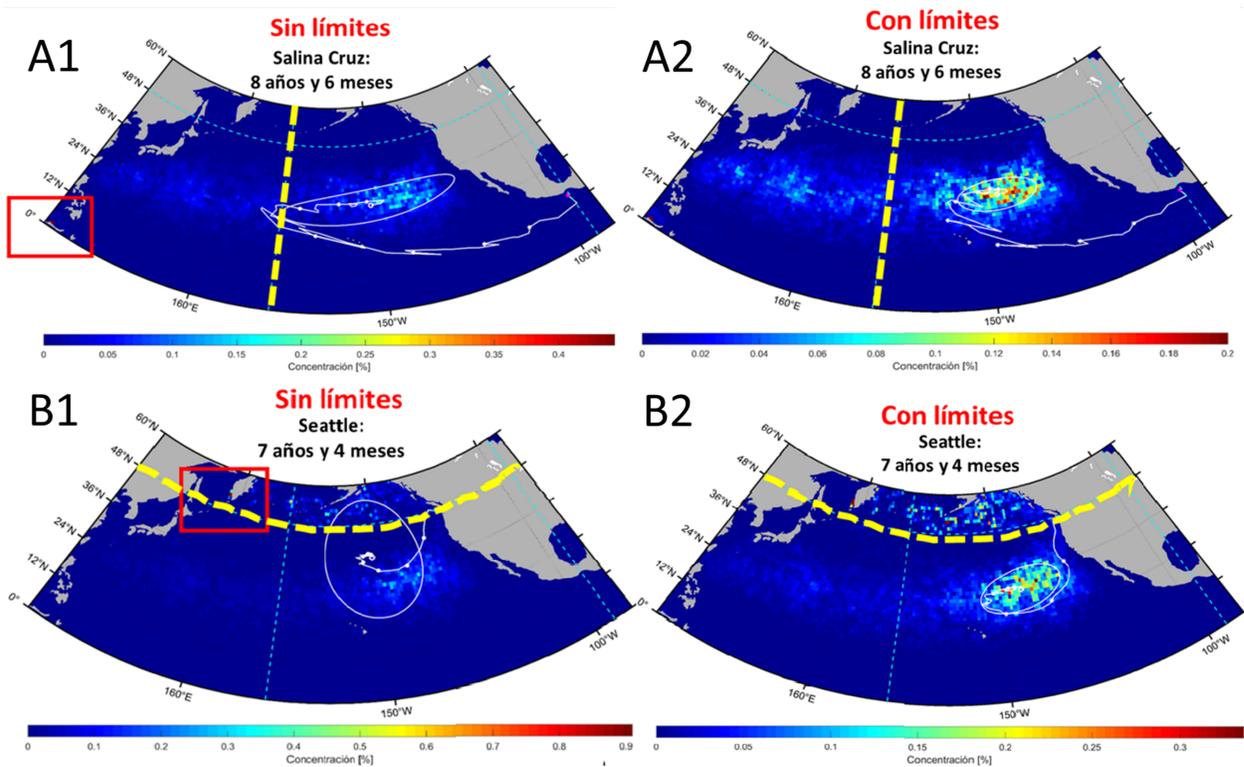


Figura 39. Comparación de experimentos con elipses sin delimitar una subregión (1) y con una región limitada (2). Cada fila compara los mismos tiempos y sitio de descarga. Las paletas de colores toman como concentración máxima la del OPN completo (1) y la de la subregión (2). Los cuadros rojos indican donde se tienen las mayores concentraciones (fuera de la subregión). Las líneas amarillas punteadas resaltan el límite de interés para cada caso.

4.7. Aspectos pendientes

La dispersión superficial de desechos marinos se puede continuar estudiando de un sin fin de maneras debido a que es un tema tan complejo como reciente. A partir de lo observado en este estudio consideramos importante continuar profundizando el conocimiento en los siguientes temas:

- Isla de basura oeste del OPN: La caracterización de esta segunda isla no formó parte de los objetivos de esta tesis. Sin embargo, fue posible notar su aparición durante el periodo de tránsito de la descarga costera hacia la isla de basura. Es probable que esta isla aparezca principalmente en invierno, que es cuando la zona de convergencia subtropical se amplía hacia el oeste (Figura 29), por lo que los desechos pueden migrar con mayor facilidad. No descartamos que esta isla pueda tener una mayor permanencia si consideramos también las descargas provenientes de la costa oeste.

- Descargas desde la costa oeste del OPN: Las costas asiáticas en el Pacífico occidental también pueden contribuir tanto a la isla de basura del este, como a una formación más permanente de la isla de basura en la región oeste. Sin embargo, debido a la baja densidad de registros en algunos bins, se consideró que los experimentos estadísticos realizados en las primeras etapas de este proyecto podrían ser erróneos en estas zonas. Cabe señalar que la mayoría de los 20 ríos más contaminantes del mundo -los cuales contribuyen al 67% de las descargas globales (Lebreton et al., 2017)- se encuentran en Asia.
- Incorporación de procesos no conservativos: En estos procesos se incluye el varamiento, la fragmentación y el hundimiento. La concentración total de plásticos en la superficie cambia con el tiempo debido a procesos como las reacciones fotoquímicas, el desgaste por las olas y la interacción con organismos. De esta manera los plásticos se fragmentan, transformándose en microplásticos. Esta transformación cambia su flotabilidad y comienzan a descender, pasando a formar parte de la “nieve marina” durante su proceso de sedimentación al fondo e interacción con ecosistemas de la columna de agua. Para obtener una mejor representación del comportamiento real de los desechos, es necesario buscar parametrizaciones adecuadas de estos procesos en forma de fuentes o sumideros en el problema de la dispersión superficial.
- Conexión entre cuencas: En este estudio se menciona la conexión de las localidades del sur del OPN con la isla de basura del Océano Pacífico Sur, así como, el escape de trazadores hacia el oeste a través de las islas cerca de Indonesia. Sin embargo, los desechos marinos superficiales descargados desde las costas del OPN podrían alcanzar otros sitios a nivel global. Por otro lado, también queda pendiente el caso contrario, la relación entre descargas desde otras cuencas oceánicas con la isla de basura al este del OPN.
- Modificaciones en las matrices de transición: (1) separar el tipo de derivadores en la estadística (con lastre y sin lastre), para visualizar mejor los forzadores propios de la superficie y capa de mezcla; (2) filtrar los bins cuya probabilidad es calculada con pocos registros, para evitar sobrestimar la acumulación de trazador en regiones incorrectas; y (3) la incorporación de probabilidades nuevas a partir de la parametrización de forzadores como la deriva de Stokes.

Capítulo 5. Conclusiones

En la presente tesis se logró caracterizar la formación de la isla de basura del OPN a partir de fuentes puntuales de descarga en las costas de norteamérica. Los resultados se obtuvieron por medio de simulaciones de las descargas usando matrices de transición y elipses de dispersión, las cuales se basan en las trayectorias históricas de boyas de deriva superficiales. A continuación se enlistan las principales conclusiones de esta investigación:

- El recorrido general de las descargas desde Norteamérica a la isla de basura del OPN se puede resumir en cuatro etapas clave: (a) el movimiento paralelo a la costa hacia el sur siguiendo la Corriente de California, (b) el movimiento hacia la región oeste del OPN siguiendo la Corriente Norecuatorial, (c) el retorno al noreste en la zona de transición, y (d) el arribo a la isla de basura.
- Las localidades consideradas se distinguieron por sus aportes relativos y tiempos de arribo a la isla de basura en dos grupos: (1) las ciudades del norte (Seattle, San Francisco y Los Ángeles) tuvieron mayores aportes relativos y menores tiempos de arribo, debido a su mayor interacción con la Corriente de California (la cual se intensifica en verano); y (2) las ciudades más al sur (Los Cabos, Acapulco y Salina Cruz), que registraron menores aportes relativos y mayores tiempos de arribo.
- Las características de la isla de basura que calculamos son: centro de masa en -145° , 31° , con una extensión de $2.59 \times 10^6 \text{ km}^2$ y orientada a 12° respecto a la dirección este.
- La dinámica y orientación de la isla de basura son influenciadas por el anticiclón atmosférico de bajos niveles. Este centro de alta presión se intensifica en verano y promueve la convergencia en la isla de basura. Esta circulación se debilita en invierno como consecuencia de las masas de aire polares, lo que disminuye la retención de desechos en la isla este del OPN.
- El estudio de los desechos superficiales marinos aún tiene bastantes interrogantes. Esta investigación propone algunos caminos si se desea continuar en el tema de dispersión superficial de basura flotante. Principalmente, se sugiere continuar

analizando el papel del viento y el oleaje en la dispersión de desechos, ya que se sabe que pueden tener varios efectos, pero aún no es posible determinar la importancia relativa de cada proceso (deriva de Stokes, deriva de Ekman, corrientes geostroficas, efectos inerciales, etc.).

Literatura citada

- Aliani, S., Basurko, O. C., Arias, M., Isobe, A., Rubio, A., Topouzelis, K., y Cózar, A. C.. 2022. Marine litter windrows. *Frontiers in Marine Science*, p. 2131.
- Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Haller, G., Farazmand, M., Triñanes, J., y Wang, Y.. 2015. Dissipative inertial transport patterns near coherent Lagrangian eddies in the ocean. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 25(8), pp. 087412.
- Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., y Lumpkin, R.. 2016. Inertia-induced accumulation of flotsam in the subtropical gyres. *Geophysical Research Letters*, 43(23), pp. 12–228.
- Bosi, S., Broström, G., y Roquet, F.. 2021. The role of Stokes drift in the dispersal of North Atlantic surface marine debris. *Frontiers in Marine Science*, p. 1137.
- Copernicus. 2021a. Global Ocean Physics Reanalysis. Consultado el 12 de marzo del 2022 de: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/.
- Copernicus. 2021b. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Consultado el 05 de marzo del 2022 de: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>.
- Cummins, P. F. y Freeland, H. J.. 2007. Variability of the North Pacific Current and its bifurcation. *Progress in Oceanography*, 75(2), pp. 253–265.
- Egger, M., Sulu-Gambari, F., y Lebreton, L.. 2020. First evidence of plastic fallout from the North Pacific Garbage Patch. *Scientific reports*, 10(1), pp. 1–10.
- Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M., y Milo, R.. 2020. Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature*, 588(7838), pp. 442–444.
- Engler, R. E.. 2012. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. *Environmental science & technology*, 46(22), pp. 12302–12315.
- Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., y Reisser, J.. 2014. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS one*, 9(12), pp. e111913.
- Fischer, R., Lobelle, D., Kooi, M., Koelmans, A., Onink, V., Laufkötter, C., Amaral-Zettler, L., Yool, A., y van Sebille, E.. 2022. Modelling submerged biofouled microplastics and their vertical trajectories. *Biogeosciences*, 19(8), pp. 2211–2234.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., y Law, K. L.. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), pp. e1700782.
- Hartmann, D. L.. 2015. *Global Physical Climatology*, Vol. 103. Newnes.
- Howell, E. A., Bograd, S. J., Morishige, C., Seki, M. P., y Polovina, J. J.. 2012. On North Pacific circulation and associated marine debris concentration. *Marine Pollution Bulletin*, 65(1-3), pp. 16–22.
- Huang, N. E.. 1979. On surface drift currents in the ocean. *Journal of Fluid Mechanics*, 91(1), pp. 191–208.

- Koelmans, A. A., Kooi, M., Law, K. L., y van Sebille, E.. 2017. All is not lost: deriving a top-down mass budget of plastic at sea. *Environmental Research Letters*, 12(11), pp. 114028.
- Kubota, M.. 1994. A mechanism for the accumulation of floating marine debris north of Hawaii. *Journal of Physical Oceanography*, 24(5), pp. 1059–1064.
- Kubota, M., Takayama, K., y Namimoto, D.. 2005. Pleading for the use of biodegradable polymers in favor of marine environments and to avoid an asbestos-like problem for the future. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67(4), pp. 469–476.
- Lebreton, L., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., y Reisser, J.. 2017. River plastic emissions to the world's oceans. *Nature communications*, 8(1), pp. 1–10.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., et al.. 2018. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific reports*, 8(1), pp. 1–15.
- Lévy, M., Franks, P. J., y Smith, K. S.. 2018. The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nature communications*, 9(1), pp. 1–16.
- Li, W. C., Tse, H., y Fok, L.. 2016. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of the total environment*, 566, pp. 333–349.
- Liu, Z.. 1994. A simple model of the mass exchange between the subtropical and tropical ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 24(6), pp. 1153–1165.
- Maxey, M. R. y Riley, J. J.. 1983. Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow. *The Physics of Fluids*, 26(4), pp. 883–889.
- Maximenko, N., Hafner, J., y Niiler, P.. 2012. Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters. *Marine pollution bulletin*, 65(1-3), pp. 51–62.
- National Academies of Sciences, E., Medicine, et al.. 2021. Reckoning with the US Role in Global Ocean Plastic Waste.
- Oceánicos, N.. 2021. Corrientes del Pacífico Norte. Recuperado el 25 de mayo del 2022 de: www.navegantesoceanicos.com.
- Pedlosky, J.. 1990. The dynamics of the oceanic subtropical gyres. *Science*, 248(4953), pp. 316–322.
- Ríos, O. Z. T.. 2021. Estudio numérico sobre el efecto del oleaje en la dispersión relativa de trazadores lagrangianos en la superficie del mar ante condiciones de huracán.
- Rochman, C. M.. 2020. The story of plastic pollution. *Oceanography*, 33(3), pp. 60–70.
- Strub, P. T. y James, C.. 2002. Altimeter-derived surface circulation in the large-scale NE Pacific Gyres.: Part 1. seasonal variability. *Progress in Oceanography*, 53(2-4), pp. 163–183.
- Tamura, H., Miyazawa, Y., y Oey, L.-Y.. 2012. The Stokes drift and wave induced-mass flux in the North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C8).

- Van Sebille, E., England, M. H., y Froyland, G.. 2012. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*, 7(4), pp. 044040.
- Van Sebille, E., Aliani, S., Law, K. L., Maximenko, N., Alsina, J. M., Bagaev, A., Bergmann, M., Chapron, B., Chubarenko, I., Cózar, A., et al.. 2020. The physical oceanography of the transport of floating marine debris. *Environmental Research Letters*, 15(2), pp. 023003.
- Wang, Y.. 2015. Through the Gyre: A review on ocean plastic pollution in the Great Pacific Garbage Patch.
- Zavala Sansón, L.. 2021. *Dispersión y difusión en el océano: Apuntes de oceanografía física*. Apuntes de Oceanografía Física.
- Zavala Sansón, L., Perez Brunius, P., y Sheinbaum, J.. 2017. Point source dispersion of surface drifters in the southern Gulf of Mexico. *Environmental Research Letters*, 12(2), pp. 024006.
- Zavala Sansón, L., Sheinbaum, J., y Pérez-Brunius, P.. 2018. Single-particle statistics in the southern Gulf of Mexico. *Geofísica internacional*, 57(2), pp. 139–150.