



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# METODOLOGÍA PARA CALCULAR LA PROBABILIDAD DE CONTAMINACIÓN EN LA COSTA POR BASURAS MARINAS DERIVADAS DEL TRANSPORTE MARÍTIMO

## Aplicación al Parque Nacional Corcovado, Costa Rica

Trabajo realizado por:

*Lita Peggy Verduga Vergara*

Dirigido:

*Ana Julia Abascal Santillana*

*Andrés García Gómez*

Titulación:

**Máster Universitario en  
Gestión Integrada de  
Sistemas Hídricos.**

Santander, octubre de 2019

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

**RESUMEN: METODOLOGÍA PARA CALCULAR LA PROBABILIDAD DE CONTAMINACIÓN EN LA COSTA POR BASURAS MARINAS DERIVADAS DEL TRANSPORTE MARÍTIMO. APLICACIÓN AL PARQUE NACIONAL CORCOVADO, COSTA RICA**

**Autor:** Lita Peggy Verduga Vergara

**Directores:** Andrés García Gómez, Ana Julia Abascal Santillana

**PALABRAS CLAVES:** Basura marina, simulación de Montecarlo, contaminación, probabilidad, transporte marítimo, Parque Nacional Corcovado, Costa Rica

**1. INTRODUCCIÓN**

La basura marina ha despertado en los últimos años alarma debido a los efectos que tiene en los sistemas físicos, biológicos y sociales, siendo objeto intensivo de estudio (UN Environment, 2019). Su facilidad para transportarse, la heterogeneidad de su densidad y sus componentes da como fenómeno a la acumulación de este material en las costas a escala global ((Jambeck et al., 2015)), siendo el Parque Nacional Corcovado ubicado en una de las zonas más biodiversas de Costa Rica uno de los lugares que están enfrentando esta problemática. Dado que la basura marina tiene proveniencia tanto marítima como de la plataforma continental, el presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objeto desarrollar una metodología genérica con base de datos meteocéánicos mundiales para calcular la probabilidad de llegada de la basura marina a esta área protegida desde las rutas de tráfico marítimos constituidos como fuentes emisoras de basura marina.

**2. MATERIALES**

Los materiales hacen referencia a los datos con que se va a trabajar en la metodología y su consecuente obtención de probabilidad de contaminación, entre la que se encuentra los datos espaciales, una base de datos mundial de velocidad de corrientes y vientos entre los años de 1979 a 2009 y el modelo numérico de transporte TESEO.

**3. MARCO METODOLÓGICO**

La metodología planteada se ejecuta de acuerdo al esquema correspondiente a la Ilustración 1, de donde a partir de los materiales se seleccionan las fuentes emisoras, se determinan los tramos receptores, se realizan análisis de sensibilidad para número de partículas y resolución de malla para, en consecuencia, ejecutar la simulación de Montecarlo en el transporte de basura marina con N escenarios, de donde mediante un análisis de sensibilidad se determina el número óptimo de escenarios que sea estadísticamente representativo y obtener la base de datos de trayectorias a la que se le aplica el correspondiente análisis estadístico. El número óptimo se lo fijó en 500 escenarios.

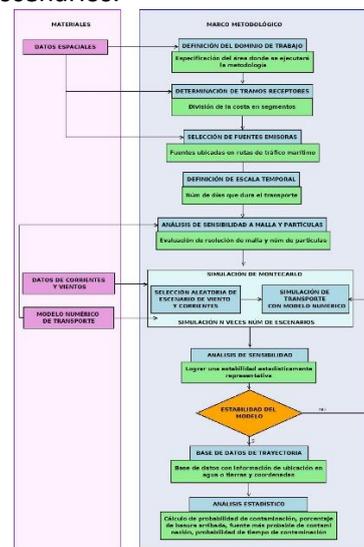


Ilustración 1: Esquema metodológico

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### -Escala regional

Las zonas que presentaron más probabilidad de contaminarse con basura marina son las regiones de Nicoya (9.04% en promedio) y el Parque Nacional Corcovado (7.32% en promedio), siendo la fuente emisora 2 quien más aporta con basura marina (64% aproximadamente). Las zonas que más basura marina acumulan según la simulación realizada son Nicoya (5.92% en promedio) y el Parque Nacional Corcovado (3.23% en promedio).

##### -Escala local: Parque Nacional Corcovado

El Parque Nacional Corcovado tiene entre el 1% al 20.2% de probabilidad de contaminarse con basura marina si la fuente emisora se ubica en las rutas de tráfico marítimo (Ilustración 2), siendo la fuente emisora 2 la que más aporta con basura marina en su acumulación y presentando el 10% de probabilidad de que el 100% de la basura descartada desde este punto llegue a la costa del área protegida en mención. Así mismo es 90% probable que tarde más de 15 días en llegar la basura marina y 10% probable que tarde 3 días en arribar.

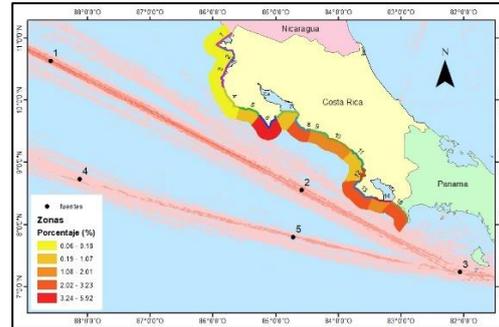


Ilustración 2: Probabilidad media de contaminación en el Parque Nacional Corcovado

##### -Discusión

Es interesante percibir una relación existente entre la costa y la proximidad espacial de las fuentes emisoras, las cuales, dependiendo de su ubicación aportan en más o en menor cantidad de basura marina a determinados puntos de la costa de Costa Rica, además que las regiones costeras son susceptible de recibir un 10% del total del contaminante si es una fuente emisora cercana, que es la basura marina.

#### 5. CONCLUSIONES

Conforme a la metodología propuesta se pudo calcular la probabilidad de contaminación por basuras marinas tanto a escala regional como a escala local, por lo que la propuesta ha permitido determinar el objetivo planteado nutriéndose de bases de datos históricos mundiales en velocidad de corrientes y velocidad de vientos de libre acceso, además de datos espaciales y el modelo numérico de transporte TESEO, y aplicando la simulación de Montecarlo.

**ABSTRACT: METHODOLOGY TO CALCULATE THE PROBABILITY OF COASTAL POLLUTION CAUSED BY MARINE LITTER FROM MARITIME TRANSPORT. APPLIED TO CORCOVADO NATIONAL PARK, COSTA RICA**

**Author:** Lita Peggy Verduga Vergara

**Directors:** Andrés García Gómez, Ana Julia Abascal Santillana

**KEYWORDS:** Marine litter, coastal pollution, Montecarlo simulation, probability, maritime traffic, Corcovado National Park, Costa Rica

**1. INTRODUCTION**

Marine litter is currently an important environmental problem that impacts on physical, biological and socio-economic systems, thus and so has been the subject of intense study (UN Environment, 2019). Due to ease of transport, and heterogeneous density, marine litter accumulates on marine surfaces and coasts (Jambeck et al., 2015). Corcovado National Park, known for its high biodiversity, is one of the areas that receives marine litter. Marine litter comes from inland sources and marine sources, thus, the present final master degree document will be focused on developing a methodology to calculate the probability of coastal pollution caused by marine litter from maritime transport using a historic current-wind speed world database and proposing release points located on maritime commercial pathways.

**2. MATERIALS**

The materials that will be used in the methodology in order to obtain the pollution probability, are: spatial database, free access current-wind speed historic database between 1979 – 2009 years and the numerical transport model TESEO.

**3. METHODOLOGICAL FRAMEWORK**

The methodology is proposed according to the scheme on Illustration 1 where, using the material mentioned above, representative release points are selected from spatial database, receiving sections are selected too from the same spatial

database and a sensitive analysis is made in order to select a proper number of particles that represent marine litter with a proper grid resolution. Next, Montecarlo’s simulation is executed with a random “N” number of scenarios with the numerical transport model TESEO, where, through an analysis of sensitive (the statically representative number of scenarios from the database) it’s possible to choose a proper number of scenarios and obtain the trajectory database of marine litter, applying the statistical process to get results. The proper number of scenarios were 500.

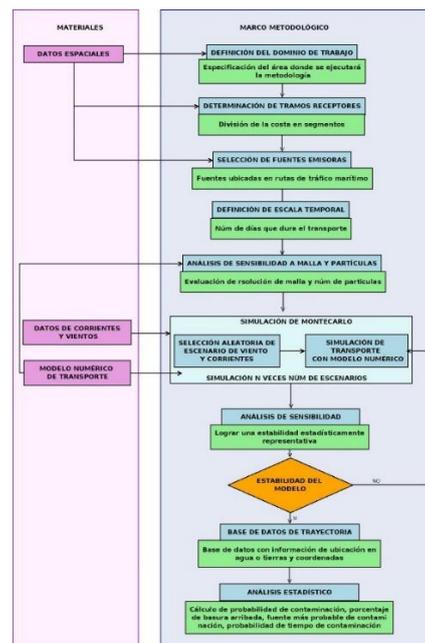


Illustration 1: Methodological scheme

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

##### -Regional level

The coastal sections most likely to be polluted by marine litter from maritime traffic are Nicoya (9.04% average) and Corcovado National Park (7.32% average), with release point number 2 being the second biggest contributor to marine litter (approximately 64%). The areas that accumulate most marine litter were Nicoya (5.92% average) and Corcovado National Park (3.23% average).

##### -Local level: Corcovado National Park

Corcovado National Park has 1% to 20.2% probability of becoming polluted by marine litter from maritime traffic sources (Illustration 2), where, release point number 2 it's the biggest contributor to marine litter accumulation in the mentioned area. It's 10% probable that 100% marine litter released from maritime traffic arrives at the National Park coastal region. In fact, it's 90% probable that marine litter could reach the coast in more than 15 days and 10% probably reach the zone in 3 days.

##### -Discussion

It's interesting to perceive a relationship between coastal regions and release points proximity, which, depending of their location, contribute more or less marine litter to the coastal zones in Costa Rica, and also that the coastal regions are susceptible to receiving 10% of marine litter of the total released if there is a nearby source of maritime traffic.

#### 5. CONCLUSIONS

Through the proposed methodology it was possible to calculate the probability of coastal pollution by marine litter from maritime transport using world currents-winds speed free database, spatial database and numerical modelling transport TESEO, where Montecarlo's simulation was the key to simulate a proper number of scenarios.

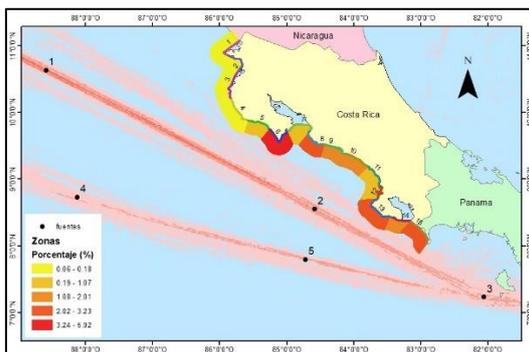


Illustration 2: Average probability of pollution by marine litter in Corcovado National Park

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	ANTECEDENTES .....	1
1.1.1.	Basura marina: marco conceptual e impactos.....	1
1.1.2.	Modelación de basura marina .....	12
1.1.3.	La problemática de la basura marina en Costa Rica: Parque Nacional del Corcovado .....	13
1.2.	OBJETIVOS.....	17
1.2.1.	GENERAL.....	17
1.2.2.	ESPECÍFICOS .....	17
2.	ÁREA DE ESTUDIO .....	18
3.	MATERIALES .....	20
3.1.	DATOS ESPACIALES.....	20
3.2.	BASE DE DATOS MET-OCEAN .....	21
3.3.	MODELO NUMÉRICO DE TRANSPORTE.....	22
4.	MARCO METODOLÓGICO.....	24
4.1.	DEFINICIÓN DEL DOMINIO DE TRABAJO .....	25
4.2.	DETERMINACIÓN DE TRAMOS RECEPTORES.....	26
4.3.	SELECCIÓN DE FUENTES EMISORAS .....	26
4.4.	DEFINICIÓN DE ESCALA TEMPORAL .....	27
4.5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE RESOLUCIÓN DE MALLA Y NÚMERO DE PARTÍCULAS	29
4.5.1.	Resolución de la malla de trabajo .....	29
4.5.2.	Número de partículas.....	30
4.6.	SIMULACIÓN DE MONTECARLO .....	33
4.6.1.	Conformación aleatoria de escenarios meteoceánicos .....	33
4.6.2.	Simulación de transporte de basura marina con el modelo numérico.....	33
4.6.3.	Base de datos de trayectoria.....	34
4.6.4.	Análisis de sensibilidad al número de escenarios .....	35
4.7.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	37
4.7.1.	Probabilidad de contaminación .....	37
4.7.2.	Porcentaje de acumulación en la costa.....	37
4.7.3.	Aportación por fuente emisora.....	37
4.7.4.	Probabilidad de acumulación en cantidad .....	38

---

4.7.5.	Tiempo de respuesta.....	39
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
5.1.	ANÁLISIS A ESCALA REGIONAL.....	40
5.1.1.	Probabilidad de contaminación por zona.....	40
5.1.2.	Distribución espacial de acumulación de basura marina.....	43
5.1.3.	Aportación de basura marina por fuente emisora.....	45
5.2.	ANÁLISIS A ESCALA LOCAL: PARQUE NACIONAL CORCOVADO.....	46
5.2.1.	Probabilidad de contaminación.....	46
5.2.2.	Cantidad de basura marina por fuente emisora.....	48
5.2.3.	Probabilidad de acumulación en cantidad.....	48
5.2.4.	Probabilidad del tiempo de llegada a costa.....	49
5.3.	DISCUSIÓN.....	51
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
6.1.	CONCLUSIONES.....	52
6.2.	RECOMENDACIONES.....	53
	BIBLIOGRAFÍA.....	54
	ANEXOS.....	59
	ANEXO I: DETALLE DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	59
	ANEXO II: TABLAS DE RESULTADOS.....	65

## ÍNDICE DE GRÁFICOS, TABLAS Y FIGURAS

### GRÁFICOS

Gráfico No. 1: Valores de arribo según el número de partículas .....	31
Gráfico No. 2: Porcentaje de arribo por número de escenarios en cada zona .....	35
Gráfico No. 3: Representación del promedio de los porcentajes de arribo respecto al número de escenarios.....	36
Gráfico No. 4: Representación de la desviación estándar del promedio de los porcentajes de arribo por número de escenarios.....	36
Gráfico No. 5: Probabilidad de contaminación por basura marina .....	40
Gráfico No. 6: Porcentaje de acumulación de basura marina por zona .....	43
Gráfico No. 7: Porcentaje de basura marina acumulada en costa según su fuente emisora .....	45
Gráfico No. 8: Probabilidad de contaminación del Parque Nacional Corcovado.....	46
Gráfico No. 9: Cantidad de basura marina aportada por fuente emisora en Parque Nacional Corcovado .....	48
Gráfico No. 10: Distribución probabilística de la cantidad de basura marina en el Parque Nacional corcovado.....	49
Gráfico No. 11: Probabilidad del tiempo de arribo a la costa .....	50
Gráfico No. 12: Representación promediada de arribos de partículas a cada zona.....	60

### TABLAS

Tabla 1: Fuentes de plásticos y microplásticos por sectores .....	3
Tabla 2: Detalle de información espacial utilizada.....	20
Tabla 3: Datos de probabilidad respecto al número de escenarios simulados.....	59
Tabla 4: Análisis de tendencias de cada zona por número de escenarios .....	60

### FIGURAS

Figura 1: Principales fuentes y vías de entrada de la basura marina en los océanos .....	2
Figura 2: Plástico mal administrado, producción y tendencias.....	4
Figura 3: Depósito de plásticos en los océanos.....	5
Figura 4: Estimación de la cantidad de plásticos en el océano. ....	6
Figura 5: Distribución y densidad de plásticos a nivel mundial .....	7
Figura 6: Número de animales reportados en enredamientos e ingestión .....	9
Figura 7: Entrada de plásticos a la cadena trófica.....	10
Figura 8: Coste del impacto de la polución por plásticos.....	11
Figura 9: Registro fotográfico de la basura marina identificada en San Pedrillo, Parque Nacional Corcovado .....	14
Figura 10: Porcentaje en peso de los desechos recogidos en San Pedrillo por Caminos Sin Plásticos.....	15

---

Figura 11: Densidad de tráfico marítimo hacia el canal de Panamá.....	16
Figura 12: Área de estudio .....	18
Figura 13: Información de la base de datos y representación espacial de las velocidades de viento en la superficie del 12 de marzo de 1993 con datos CSFR.....	21
Figura 14: Marco metodológico para el cálculo de probabilidad de contaminación. ....	24
Figura 15: Dominio espacial de trabajo.....	25
Figura 16: Segmentación del perfil costanero de Costa Rica y ubicación de ruta de navegación.....	26
Figura 17: Fuentes emisoras de basura marina .....	27
Figura 18: Transporte de partículas en distintos períodos de tiempo.....	28
Figura 19: Transporte de basura sobre mallas de distinta resolución .....	29
Figura 20: Representación de la adherencia de las partículas a la costa en una malla de 20km de resolución.....	30
Figura 21: Trayectoria de partículas en distintos tipos de cantidades.....	32
Figura 22: Esquema de configuración de TESEO.....	34
Figura 23: Representación de la función de distribución probabilística del vertido de un hidrocarburo .....	38
Figura 24: función de distribución del tiempo de respuesta .....	39
Figura 25: Probabilidad de contaminación por basura marina en la costa.....	42
Figura 26: Representación espacial de las zonas de acumulación de basura marina.....	44
Figura 27: Representación espacial de la probabilidad de contaminación hacia el Parque Nacional Corcovado .....	47

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

#### 1.1.1. Basura marina: marco conceptual e impactos

Los océanos a través del devenir de la humanidad, han constituido una parte elemental de su desarrollo, ya sea por ser una fuente de alimentación o bien sea por transporte hasta dar lugar al comercio y la expansión política y cultural entre civilizaciones. Los océanos además albergan un importante sistema ecosistémico, además de regular el clima y formar parte del ciclo hidrológico. Debido a que está estrechamente relacionado con el desarrollo socioeconómico humano (Bergmann, Gutow, & Klages, 2015) es objeto de presiones, que van desde el vertido de efluentes contaminantes, hasta la acidificación producto de gases efectos invernadero, sin olvidar al cambio climático. Dentro de las problemáticas que asolan a los océanos se encuentra la basura marina, la cual ha tomado vital importancia debido a su estrecha relación con el degrado del ecosistema marino, el impacto sobre la pesca (es decir la cadena alimentaria) además del impacto socioeconómico traducido en costes de gestión o pérdidas económicas.

La basura marina es definida por el Programa de las Naciones Unidas como “cualquier material sólido descartado con origen de manufactura, o procesado, el cual es dispuesto o abandonado en el ambiente marino costero” (UN Environment, 2019). Los desechos son originados a través de las actividades inherentes al ser humano, como la alimentación, el vestido, el transporte e inclusive el ocio. La economía lineal o cultura del descarte, da como resultado la disposición de desechos en vertederos mal gestionados o directamente sobre los cuerpos hídricos, ya sean estos dulces o salados, lo cual provoca que se depositen, permanezcan y acumulen en los océanos como destino final (Cózar et al., 2014). El problema de la basura no es reciente dado que está estrechamente relacionado al desarrollo socioeconómico ligado a la revolución industrial del siglo XIX y el desarrollo de los polímeros, cuyo auge en el uso ha aumentado vertiginosamente en los últimos 50 años (Ryan, 2015). La basura, al tratarse de un elemento antrópico y distinto del entorno natural marino, provoca una serie de impactos, detonándose efectos sinérgicos como la pesca fantasma, la acumulación de desechos en costas lejanas hasta el ingreso a la cadena alimenticia (Rochman et al., 2015), por citar a los principales (CONAMA, 2016).

Se estima que en los océanos se depositan aproximadamente de 4.2 a 12.7 millones de toneladas de basura al año (Jambeck et al., 2015), los cuales presuntamente proceden en su mayoría de las zonas terrestres, sobre todo en costas densamente pobladas, además del tráfico marítimo en aguas abiertas por actividades comerciales (UNEP, 2009). Diversos autores coinciden en que el 80% de la basura marina proviene de fuentes terrestres, mientras que se asume que el 20% corresponde a fuentes marítimas (Lebreton, Greer, & Borrero, 2012). La basura marina proveniente de la parte marítima (Figura 1) está asociada a las actividades de pesca, el comercio, cruceros, flotas militares y de investigación, además de instalaciones offshore (plataformas petroleras y de acuicultura) (Galgani, Hanke, & Maes, 2015).

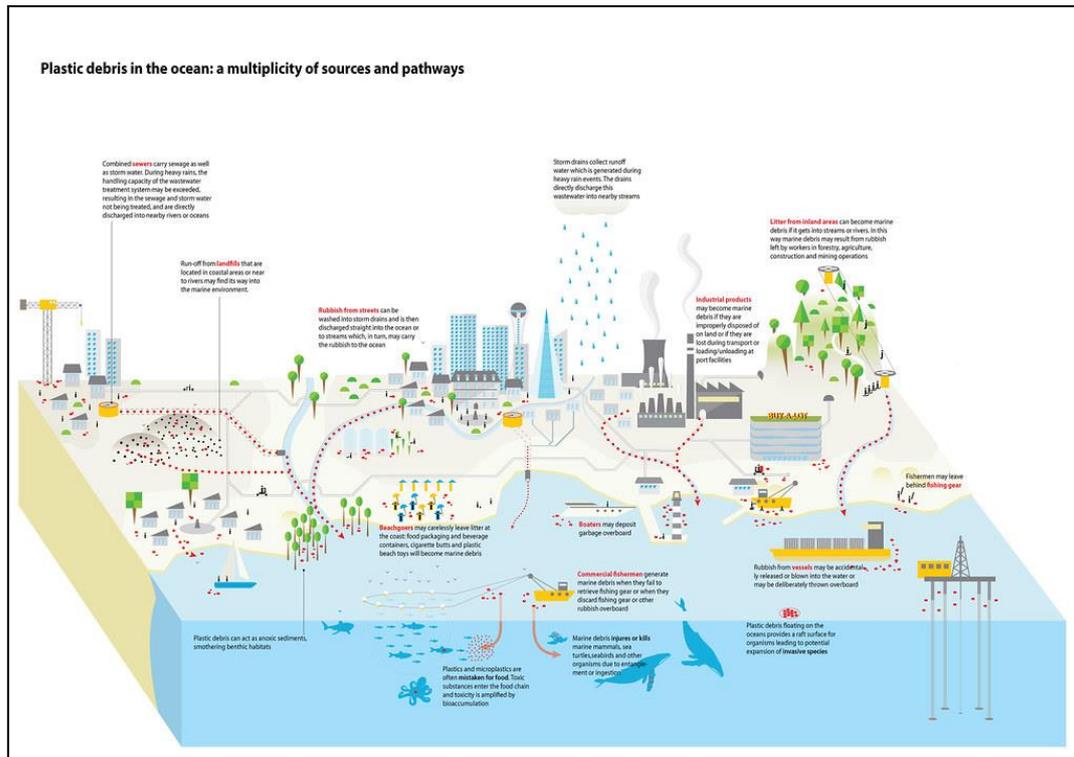


Figura 1: Principales fuentes y vías de entrada de la basura marina en los océanos. Fuente: (UNEP & GRID Arendal, 2016).

La infografía muestra las vías usuales por donde la basura marina entra en los océanos considerando a las terrestres y marinas; gran parte proviene de las actividades antrópicas desarrolladas en la parte continental siendo los ríos, el borde costero y el sistema sanitario, además de las industrias y ciudades. En cuanto a las fuentes marítimas, las principales vías y fuentes las constituyen fundamentalmente los barcos destinados al comercio, la pesca y la recreación de lo cual determina el tipo de desecho, cuyas vías (pesca por ejemplo) puede ser redes descartadas o no recuperadas en las labores, o por ejemplo en las rutas comerciales donde deliberadamente o accidentalmente se vierte basura directamente en los océanos.

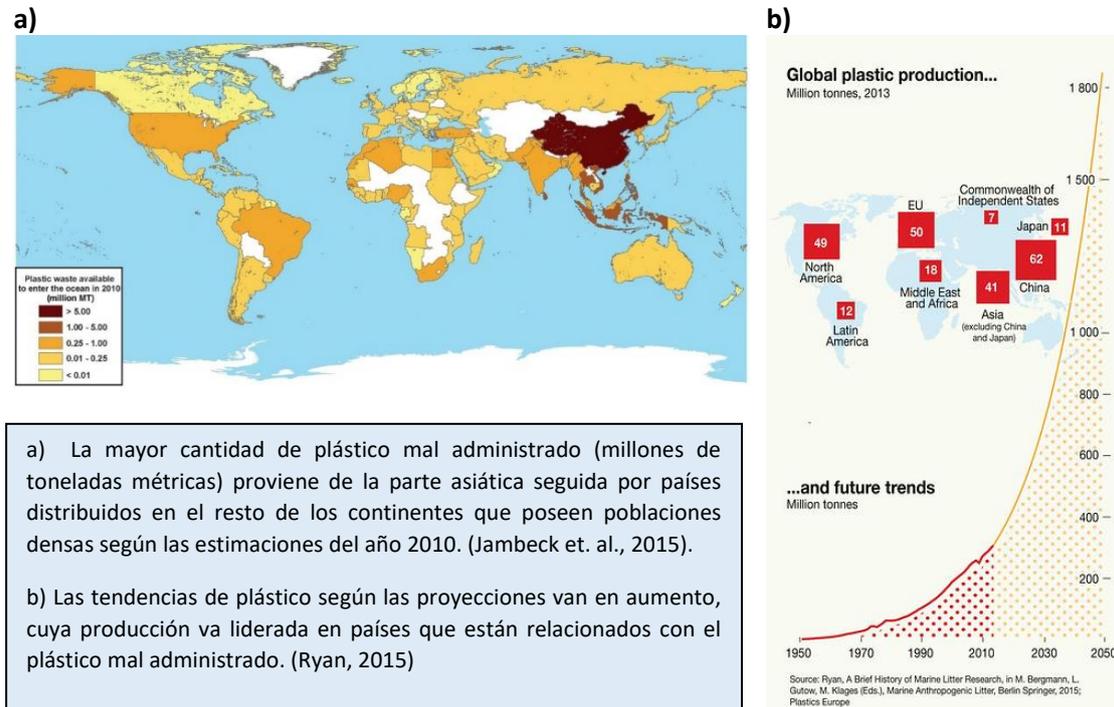
La basura marina, al provenir de diferentes actividades presenta una variabilidad constituida principalmente por plásticos, textiles, metales, vidrio, papel/cartón y residuos orgánicos, siendo los primeros citados los más abundantes, representando entre un 60-90% de los residuos marinos (Galgani et al., 2015). La composición y acumulación de la basura marina (plásticos específicamente) en las playas o aguas abiertas varía entre una región y otra ya que depende en gran medida de las actividades socioeconómicas y de los patrones meteoceánicos regionales, sin embargo los envases, las redes de pesca y piezas pequeñas de poliestireno son quienes lideran el porcentaje dentro de la basura marina (Galgani et al., 2015). En el caso concreto de América Central y América del Sur, la cantidad de plásticos está dominado por los provenientes de la parte continental, aunque las artes de pescas (ámbito marítimo) también son abundantes (Barnes et. al, 2009).



Tabla 1: Fuentes de plásticos y microplásticos por sectores. Fuente: (GESAMP, 2016). Adaptación.

Categoría	Fuente	Descripción	Vía de entrada
Productores	Fabricantes y recicladores	Fragmentos y pellets	Ríos, línea de costa, atmósfera
Sectores de consumo	Agricultura	Plásticos de invernadero, tuberías, macetas, nutrientes	Ríos, línea de costa, atmósfera
	<b>Pesca</b>	<b>Redes de pesca, embalajes</b>	<b>Ríos, puertos, zona marítima</b>
	<b>Acuicultura</b>	<b>Material flotante, líneas de pesca, redes, tuberías PVC</b>	<b>Ríos, puertos, zona marítima</b>
	Construcción	Poliestireno expandido, embalaje	Ríos, línea de costa, atmósfera
	Transporte terrestre	Pellets, neumáticos, polvo de neumáticos	Ríos, línea de costa, atmósfera
	<b>Industria marítima</b>	<b>Recubrimientos, tuberías, textiles, misceláneos, fragmentos de plástico, carga</b>	<b>Ríos, zona marítima</b>
	Turismo	Bienes de consumo, embalaje, microperlas, fibras textiles	Ríos, línea de costa, atmósfera
	Industria textil	Fibras	Ríos, línea de costa, atmósfera
	Deportes	Césped sintético	Ríos, línea de costa, atmósfera
Consumidores individuales	Embalaje de un solo uso en alimentación y bebida	Contenedores, bolsas de plástico, botellas, tapas, tazas, platos, cucharas, pajitas, etc.	Ríos, línea de costa
	Cosméticos y productos de cuidado personal	Microperlas, embalajes, cepillos dentales, etc.	Ríos, línea de costa, zona marítima
	Textiles y prendas de vestir	Fibras	Ríos, línea de costa, atmósfera
Gestión de desechos	Desechos sólidos	Desechos sin gestión o gestión deficiente	Ríos, línea de costa, atmósfera
	Vertidos	Microperlas, fragmentos, fibras	Ríos, línea de costa

La mayoría de plásticos que se vierten hacia los océanos tienen por fuente principal a las costas asociado con la densidad poblacional, lo cual se ha determinado entre un balance de producción de plástico, su uso y la gestión ineficiente en un supuesto de 50 km de borde costero (Jambeck et al., 2015), sin embargo la tendencia es un aumento bajo las condiciones actuales de la producción y descarte de este material, llegando a un aproximado de 1800 Millones de Toneladas para el año 2050 –Figura 2: Plástico mal administrado, producción y tendencias. Fuentes: (Jambeck et al., 2015), (UNEP & GRID Arendal, 2016), (Ryan, 2015).



a) La mayor cantidad de plástico mal administrado (millones de toneladas métricas) proviene de la parte asiática seguida por países distribuidos en el resto de los continentes que poseen poblaciones densas según las estimaciones del año 2010. (Jambeck et al., 2015).

b) Las tendencias de plástico según las proyecciones van en aumento, cuya producción va liderada en países que están relacionados con el plástico mal administrado. (Ryan, 2015)

Figura 2: Plástico mal administrado, producción y tendencias. Fuentes: (Jambeck et al., 2015), (UNEP & GRID Arendal, 2016)

Los plásticos se vienen produciendo desde los años 1950, lapso desde el cual se ha venido acumulando en los ambientes terrestres, aguas abiertas y costas (Barnes et al., 2009). Una buena parte de los plásticos se depositan sobre costas lejanas al origen, se mantienen en la superficie del agua en grandes cúmulos, se ubican en la columna de agua y en el fondo marino, lo cual depende en buena parte de la densidad del material polimérico y de la fragmentación que sufra debido a las condiciones meteoceánicas –Figura 3- (Galgani et al., 2015). Se estima que alrededor del 46% de los plásticos son flotantes lo que explica que se mantengan sobre la superficie o sobre las costas (Barnes et al., 2009). En el caso del depósito de las basuras marinas en las playas o bordes costeros, la composición hallada sobre su lecho varía en función de las actividades circundantes o de los flujos regulares externos de basura, además que la acumulación está condicionada por la forma de la playa, su localización y la naturaleza de la basura que se deposite en ella, presentando una alta correlación del flujo con la abundancia (Galgani et al., 2015).

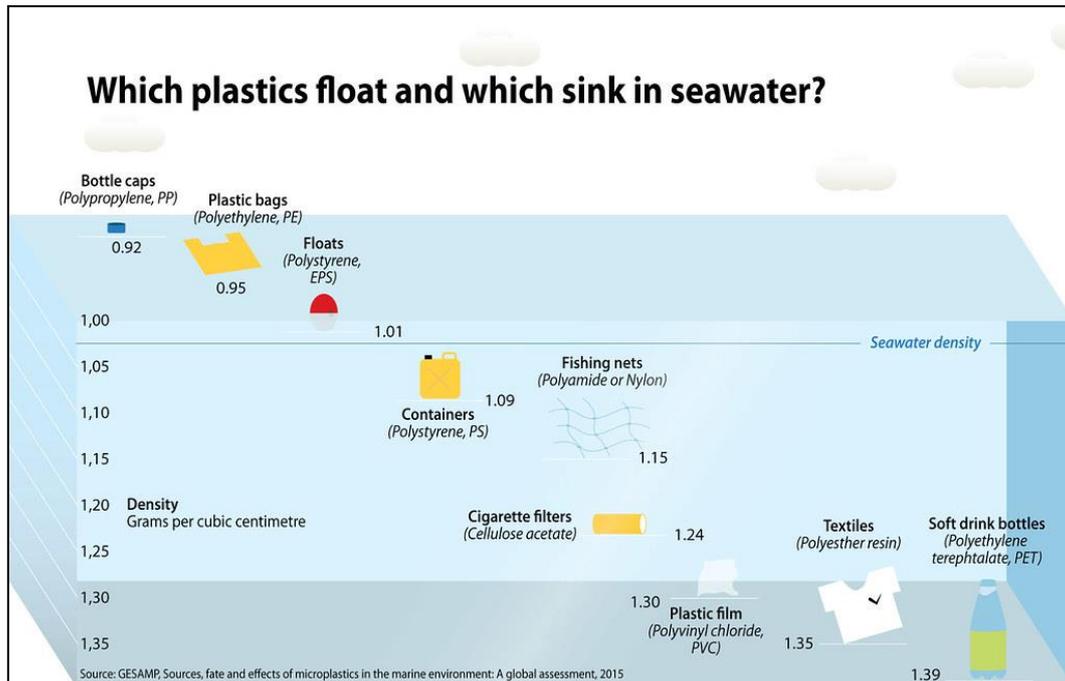


Figura 3: Depósito de plásticos en los océanos. Fuente: (UNEP & GRID Arendal, 2016)

La densidad de los plásticos va a estar determinada en función del tipo de polímero del que estén conformadas y por tanto dependiendo de ello se acumulan y distribuyen en sitios específicos, como puede ser la superficie (tapas, bolsas plásticas, poliestireno), la columna de agua (redes, contenedores, colillas) y el fondo marino (textiles, botellas, pvc), por tanto los forzamientos a los que se ven sometidas serán distintos y su distribución estará dependiente en gran medida por ello. Los flotantes son más probables de acumularse en "islas" o bien derivarse en costas (playas).

En el caso de los plásticos flotantes, éstos se almacenan directamente sobre la superficie o en las costas por acción de la corriente y los vientos (Figura 4), además que también sufre degradación, transformándose en fragmentos, cuyas condiciones físico químicas cambian por factores externos y propios del material (Galgani et al., 2015). Respecto a la cantidad de este material presente en el lecho marino, se han realizado estimaciones del volumen existente, hablándose de toneladas de plásticos acumulados en los océanos.

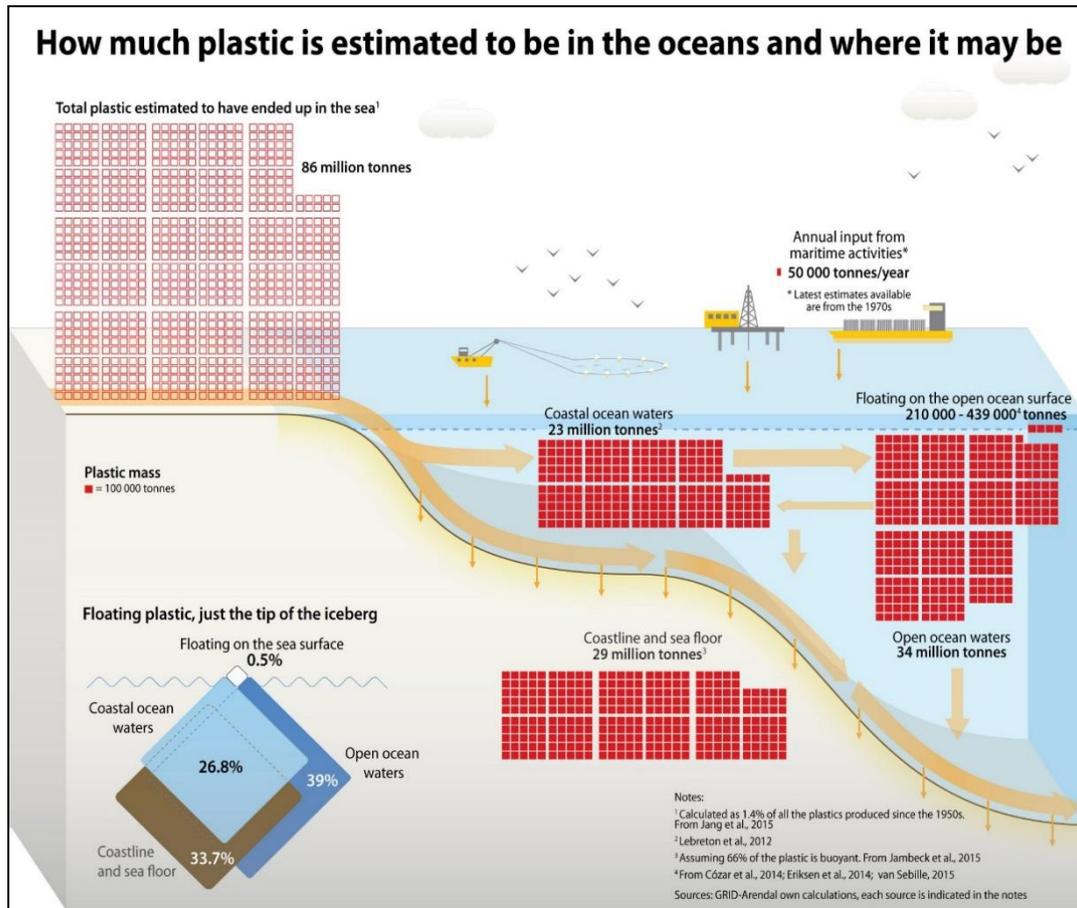


Figura 4: Estimación de la cantidad de plásticos en el océano. Fuente: (UNEP & GRID Arendal, 2016).

A partir de los estudios realizados en conjunto con sus determinaciones, GRID-Arendal ha realizado una estimación a partir de los mismos, mostrando que la mayoría de toneladas en los océanos están depositados sobre aguas abiertas y que la basura flotante tan solo muestra una parte de la gran problemática. Las costas y el lecho marino también albergan gran parte de los desechos. (UNEP & GRID Arendal, 2016).

La acumulación de plásticos u otras basuras marinas ha dado lugar a la aparición de “giros” (Figura 5), que representan las denominadas “islas” de plástico. Los giros (islas de plástico) son formados por los forzamientos de las condiciones meteocénicas, donde predomina la acción de la corriente sobre los materiales densos y el viento sobre los flotantes, convergiendo en zonas comunes en las aguas abiertas. Se calcula que existen aproximadamente 5.25 trillones de partículas de plástico con un peso de 268,940 toneladas con datos correspondientes hasta el año 2014 (Eriksen et al., 2014). Es importante indicar que los datos de basura marina presentes en los giros del hemisferio sur son escasos por lo que la determinación de la abundancia de plástico puede presentar sesgos (Van Sebille et al., 2015).

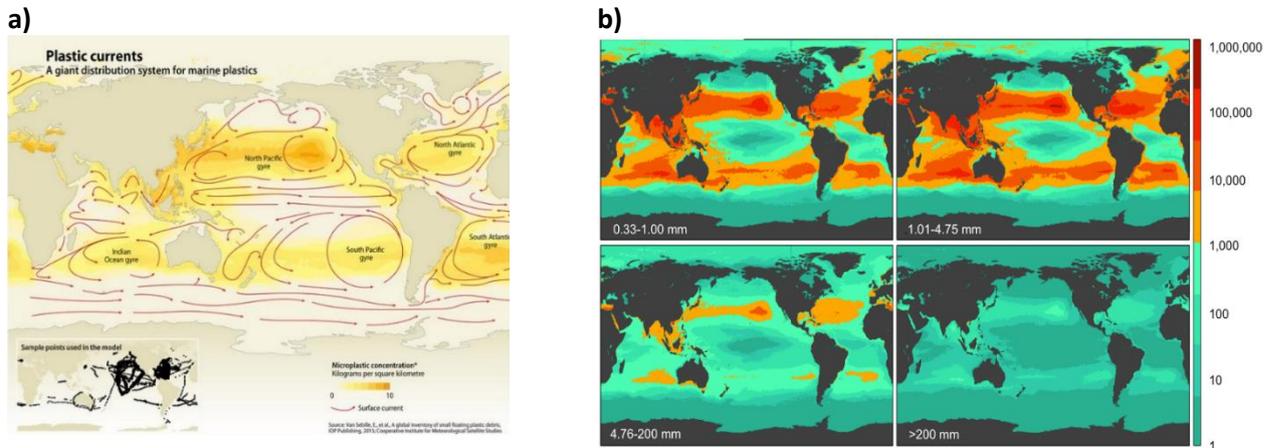


Figura 5: Distribución y densidad de plásticos a nivel mundial. Fuente: (UNEP & GRID Arendal, 2016), (Eriksen et al., 2014)

a) A nivel mundial, los giros de plásticos están dominados por los forzamientos meteorocénicos (corrientes y vientos), estando presentes en todos los grandes cuerpos marinos tanto en el hemisferio norte como en el sur. Nótese que las zonas del Pacífico Norte son la que mayor densidad de microplásticos presenta. (Van Sebille et al., 2015).

b) La densidad de plásticos por kilómetro cuadrado dependen de su tamaño, pudiéndose observar que para cada rango entre 0.33-4.75 mm la densidad es mayor que para tamaños más grandes y que la predominancia de concentración la lidera el pacífico norte, presumiblemente por estar cerca de zonas altamente pobladas de Asia y Norteamérica. En cuanto al hemisferio sur, el océano Índico presenta mayor densidad frente al Pacífico Sur. Las partículas mayores a 200 mm se registran como escasas según el modelo realizado. (Eriksen et al., 2014).

Otro tipo de basura marina que son de gran preocupación son los denominados “microplásticos” que son aquellos fragmentos menores a 1 $\mu$ g formados por varios materiales y que al ser heterogéneos pueden distribuirse desde zonas costeras hasta aguas profundas o mantenerse en la columna de agua, siendo propensos a transportarse de manera más rápida y llegar hasta lugares remotos como el Ártico, además de ingresar a la cadena alimentaria y de presentar dificultades a la hora de estudiar su composición y abundancia (Galvani et al., 2015).

### Impactos en el medio biótico

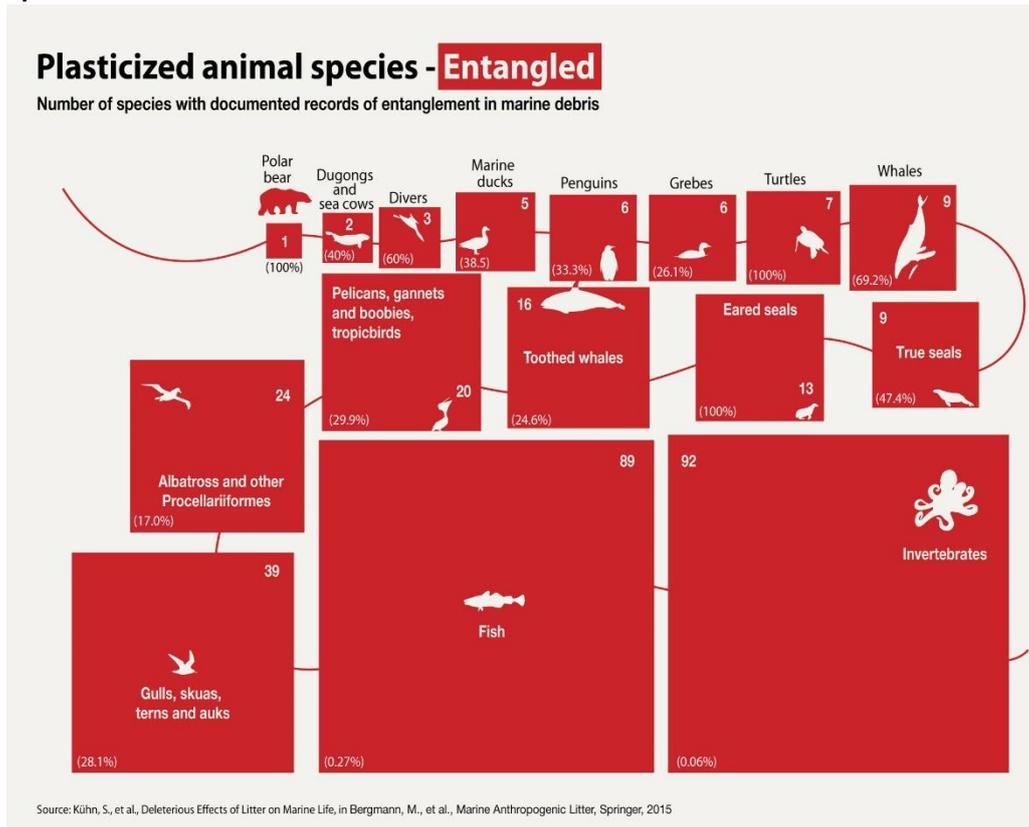
Los efectos de la basura marina son amplios y abarca diversos sectores como el físico, biótico y socioeconómico (UNEP, 2009). En el aspecto ecológico se relaciona más con la fauna marina, las cuales sufren enredamientos o atrapamientos en artes de pesca abandonados, además de la ingesta de fragmentos los cuales causan trastornos en las especies marinas como la mortalidad de las mismas o alteraciones en el sistema digestivo como la malnutrición (Kühn, Rebolledo, & Van Franeker, 2015). Otro aspecto ecológico relacionado con la basura marina y que no es menos alarmante es el de ser una vía transmisora de especies invasoras, las cuales aprovechan este tipo de material para el transporte y colonización de otros espacios (NOAA, 2017).

Según los datos recabados por Kühn y colaboradores en el año 2015 en su reporte para el libro Marine Anthropogenic Litter, el porcentaje de especies reportadas por enredamiento está representado por un 100% de tortugas marinas, 67% de focas, 31% de ballenas y un 25% de aves marinas (Figura 6); en el caso de otros reptiles, invertebrados y peces aún no se han investigado a profundidad por lo que no se tienen datos apropiados del fenómeno en ellos (Kühn et al., 2015). Las especies marinas se enredan en las artes de pescas como redes abandonadas o



descartadas que permanecen por tiempos prolongados en el agua, aun cuando no se esté realizando actividades de pesca, lo que se denomina “pesca fantasma<sup>1</sup>”; tanto el tamaño como la estructura del plástico además de su ubicación, determinan los riesgos de enredamiento, como aquellos que se localizan cerca de las costas que presentan el mayor riesgo para las especies (Kühn et al., 2015).

a)



<sup>1</sup> El “ghost fishing” también conocido como “pesca fantasma” se refiere a las especies marinas capturadas por artes de pesca (aparejos, redes) que han sido descartadas y/o abandonadas. La pesca fantasma representa un grave problema no sólo biológico, sino también económico, debido a que reduce las reservas disponibles de los recursos en los océanos. (Macfadyen, Huntington, & Cappell, 2011).

b)

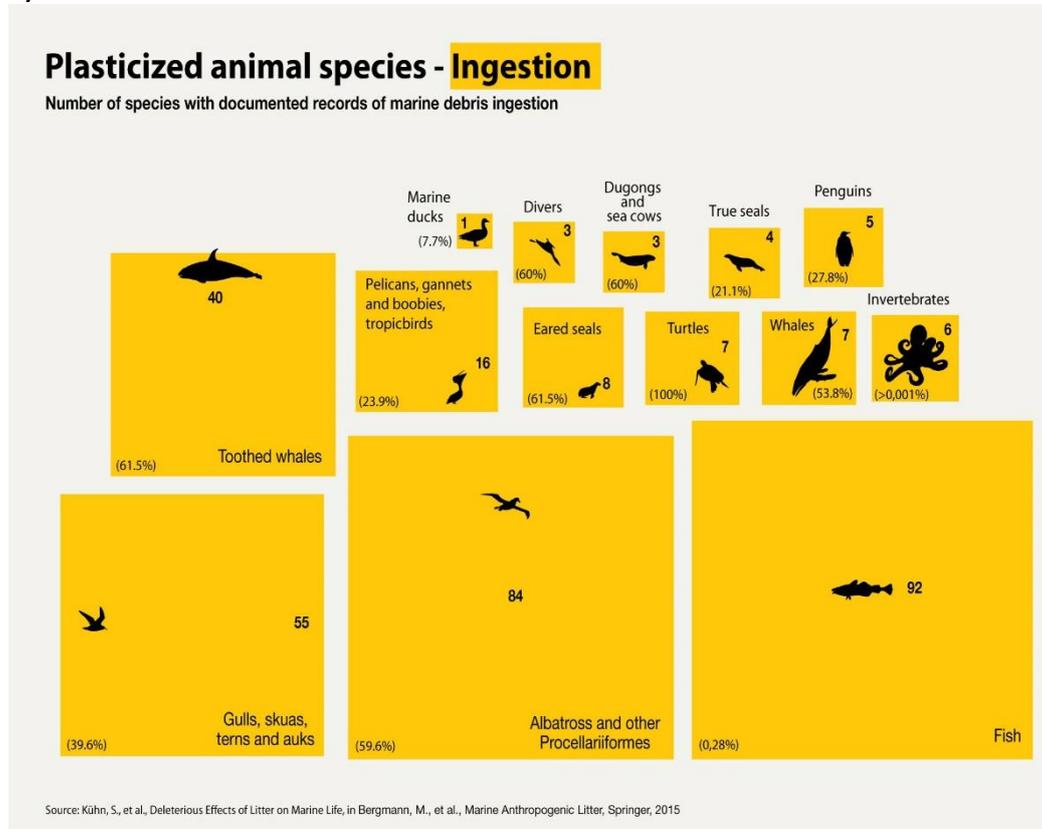


Figura 6: Número de animales reportados en enredamientos e ingestión. Fuente: (UNEP & GRID Arendal, 2016).

a) Según los recuentos realizados en diversos estudios, las especies que más registros presentan en número de enredamientos son los invertebrados, a pesar de que la determinación del número de los mismos es menos precisa; sin embargo los invertebrados presentan el menor porcentaje de enredamiento respecto a mamíferos y aves marinas, quienes lideran la lista. En parte el comportamiento de estas especies influye en la probabilidad de padecer enredamientos. Kühn et al., 2015.

b) En cuanto a la ingestión de basura marina el mayor porcentaje lo lideran los grandes mamíferos marinos, sin embargo un gran número de peces han reportado ingestión aunque sean en menor proporción. Las aves marinas y tortugas también tienen una alta representación en la ingesta de los mismos. Es preciso indicar que el comportamiento también influye, ya sea por patrones de curiosidad o por confusión de presas. Kühn et al., 2015

La ingestión de desechos marinos es otro causante de impactos sobre la vida marina, de lo cual se reporta que la ingestión de los mismos ha sido documentado para un 100% de tortugas marinas, 59% de ballenas, 36% de focas y 40% de aves marinas (Kühn et al., 2015); es indispensable indicar que a mayor fragmentación del plásticos, mayor disponibilidad tendrá de ser ingerida (Kühn et al., 2015), tal es el caso reportado en especies pelágicas en el mar del norte, en donde el 16% de la muestra mostraba existencia de plástico en su sistema digestivo (Rummel et al., 2016), o en el caso del giro del pacífico norte en donde se halló que el 35% de los peces examinados cercanos a esta ubicación contenían plásticos en sus intestinos (Boerger et al., 2010).

Los pequeños fragmentos de plástico a menudo son confundidos como alimentos por aves marinas, tortugas o bien sea peces o crustáceos en fragmentos mínimos. La ingesta de este material, provoca en las aves daños digestivos ya sea por la ocupación del plástico o por su

toxicidad, así mismo se repite para las otras especies, que inclusive al tener ocupadas las cavidades pueden tener efectos de malnutrición (Laist, 1997). Ya que gran parte de la cadena alimenticia humana está enfocada en el consumo de peces y bivalvos, puede decirse que los mismos representan una vía de entrada hacia el sistema digestivo humano, ya que el mismo presenta rastros de microplásticos en el organismo (Schwabl et. al., 2018) aunque no puede asegurarse que sea precisamente la ingesta la principal razón ya que se han hallado también vías aéreas y factores ambientales que interactúan con los hábitos de consumo.

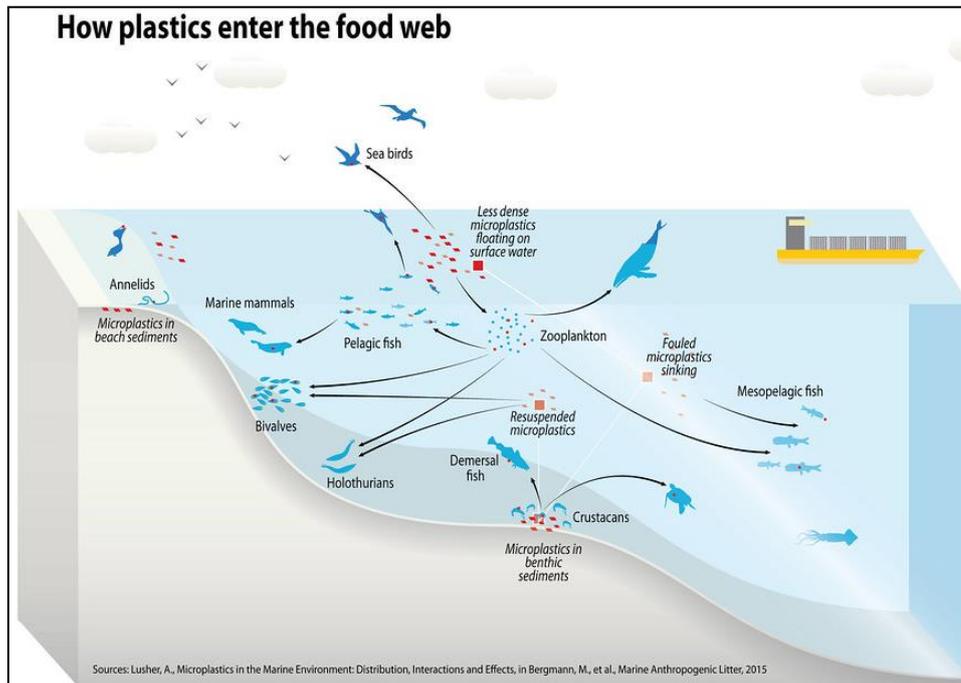


Figura 7: Entrada de plásticos a la cadena trófica. Fuente: (UNEP & GRID Arendal, 2016)

Los plásticos además de constituir una amenaza para el desarrollo de las especies debido a los efectos indicados (toxicidad, malnutrición, daños digestivos), también se transportan entre especies, ingresando de esta manera en la cadena alimenticia. La ingesta directa llevada a cabo ya sea por aves marinas es “trasladada” hacia las crías o mediante deposiciones, mientras que en el caso de peces o reptiles, al ser presas para otros predadores como mamíferos se produce una ingesta “secundaria”. Los plásticos que se encuentran en sedimentos llegan hasta los bivalvos, los cuales son parte de la cadena alimenticia humana, así como crustáceos y peces. Kühn et al., 2015.

Además de los efectos antes citados en referencia a la basura marina, se ha identificado que este mismo material debido a su movilidad puede ser un vector de transmisión de especies invasoras, sin embargo la mayoría de casos reportados corresponden a cortas distancias ya que las más largas presentan retos en la supervivencia de las especies invasoras debido a la disponibilidad de alimento necesario, la salinidad, el oleaje, entre otros (NOAA, 2017) siendo el flujo marítimo la primera causa de introducción de especies alóctonas (Molnar et. al., 2008). Otra vía de transporte de especies son los desastres naturales como tsunamis en la cual aprovechan al material no biodegradable como medio de desplazamiento ante la magnitud del evento, con la posibilidad de arribar a costas lejanas; las tormentas el aumento en su magnitud también podría tener el mismo efecto (Treneman et al., 2017).

## Impactos en el medio socioeconómico

Uno de los impactos más tangibles a nivel social respecto a la basura marina es el

relacionado con el depósito de desechos en zonas costeras, especialmente aquellas que viven del turismo, ya que la acumulación de residuos sobre las mismas afecta la percepción estética de la zona (con el consiguiente coste de gestión y limpieza) y por tanto la dinámica económica alrededor del mismo (UNEP, 2017). Sin embargo otras actividades económicas que se desarrollan en torno a los océanos como la acuicultura y la pesca también reciben afectación por la pesca fantasma, que está en íntima relación con los daños ecológicos en las especies marinas como antes se ha detallado. La actividad comercial derivada del transporte marítimo tampoco está exenta de afectación, ya que los costes por daños provenientes de obstrucciones por desechos representan un impacto económico a considerarse (UNEP, 2017).

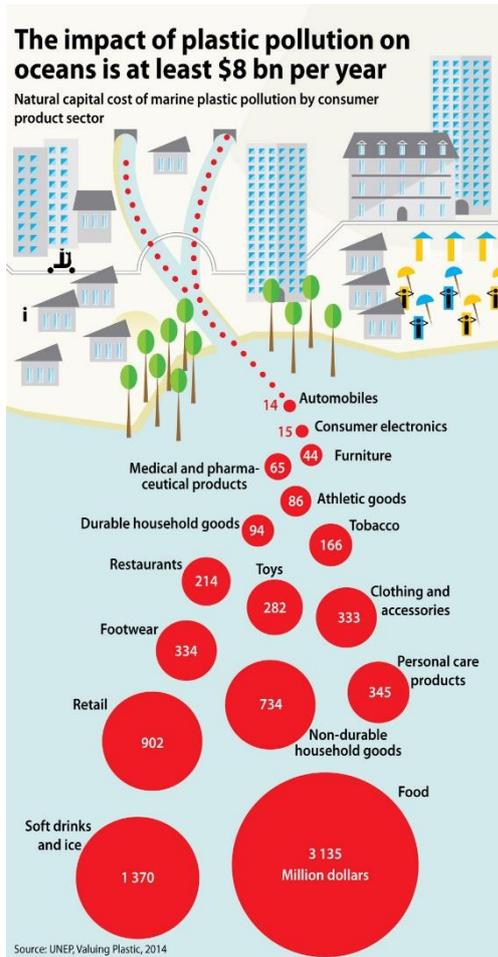


Figura 8: Coste del impacto de la polución por plásticos. (UNEP & GRID Arendal, 2016)

El cálculo del coste por polución marina en los océanos se ha determinado por la metodología del valor del capital natural en relación con los bienes de consumo, liderando el coste las áreas de alimentación; sin embargo también entra en los mismos los costes de gestión municipal en las áreas de recreación de los bordes costeros, lo cuales impactan directamente a los presupuestos de servicios públicos. UNEP, 2014.

Según una encuesta realizada al sector pesquero en el informe de KIMO, el 88% de los buques encuestados dijeron ver reducidas sus capturas debido a la basura en el mar, un 82% vio sus capturas contaminadas por basura y el 95% sufrieron daños en sus aparejos de pesca debidos a la basura (Mouat, López, & Bateson, 2010). Las Naciones Unidas a través de su Programa para el Ambiente (PNUMA), realizó en el año 2014 una valorización del plástico desde el punto de vista del uso y de su impacto a través de la industria de bienes de consumo (Figura 8), determinándose que el coste de capital natural del plástico usado en los bienes de consumo se ubican en aproximadamente 75 billones de dólares por año liderada las compañías alimenticias representando el 23% del capital natural. Se estimó que en el término de la cadena productiva (vertido desechos al mar) el coste de capital natural es aproximadamente 13 billones de dólares percibiéndolo desde el impacto económico del sector pesquero y limpieza de balnearios (UNEP, 2014).

### 1.1.2. Modelación de basura marina

Con base en la capacidad de transporte de los plásticos gracias a sus características, diversos estudios han modelado las trayectorias que éstas siguen en función de las condiciones climáticas y oceánicas, asumiéndose a los plásticos como “partículas” para su posterior aplicación en modelos lagrangianos (Van Sebille et al., 2018). A partir de estas aproximaciones se ha buscado detectar los patrones generales del movimiento de la basura en las corrientes marinas a nivel global (Lebreton et al., 2012) o a escala regional como el mar Mediterráneo (Brandini et al., 2018), de modo que puedan utilizarse como una herramienta tanto para predecir su distribución y zonas de acumulación como para el “backtracking” en el caso que se busque identificar las fuentes a partir del arribo de desechos en determinadas zonas costeras (Carlson et al., 2017).

Generalmente los métodos utilizados para estimar las vías de transporte de partículas sobre el océano son los eulerianos y lagrangianos, de lo cual los primeros hacen uso directo de los campos de velocidades, mientras que los segundos en mención simula partículas virtuales cuyas trayectorias están determinadas por las velocidades (Van Sebille et al., 2018). Una gran ventaja de los experimentos con partículas lagrangianas es que pueden transportarse por advección hacia atrás en el tiempo lo cual permite investigar en qué masas de agua se encuentra dado un lugar de origen (Van Sebille et al., 2018). La cinemática Euleriana es complementaria con la cinemática Lagrangiana, por lo que el propósito técnico de un análisis lagrangiano en los océanos es la estimación de la trayectoria de las partículas haciendo uso de una información de fluido euleriano (Van Sebille et al., 2018). Se consideran que las trayectorias lagrangianas que son relevantes para el transporte de la basura marina en escalas temporales son las corrientes costeras además de los subgiros (Carlson et al., 2017).

El conjunto de dispersión de las partículas y su tasa de cambio son fundamentales en el diagnóstico lagrangiano para entender el transporte (Van Sebille et al., 2018). Una manera común de visualizar la trayectoria es agrupar la posición de las partículas en histogramas que cuando se normaliza da como resultado un mapa de probabilidades; también se puede producir un mapa de probabilidades contando las llegadas de partículas una vez por compartimento y normalizándolo para el total de partículas: ambos métodos son válidos para identificar los flujos a través de los cuales las partículas se transportan desde el punto donde se lanzan el conjunto de las mismas (Van Sebille et al., 2018). La modelación a escala global de la basura marina realizada por Lebreton y colaboradores en el año 2012 utilizó un modelo hidrodinámico que resolviera las ecuaciones de transporte y describir los movimientos del agua, luego de lo cual se introdujeron partículas virtuales para que sea transportada por los forzamientos; el modelo del transporte de la partícula usó una ecuación de advección de segundo orden (Lebreton et al., 2012). Los escenarios configurados para determinar el transporte global se formularon en función de las presiones presentes en los océanos como es la densidad poblacional, las zonas impermeables donde discurrían más los flujos continentales y las rutas marítimas (Lebreton et al., 2012). Es preciso indicar que la velocidad de la basura marina comprende tres componentes: las corrientes oceánicas, velocidad por la difusión y la velocidad por el viento (Yoon, Kawano, & Igawa, 2010).

Con base en lo descrito en este acápite, se puede decir que los modelos numéricos representan un componente muy importante dentro de la modelación de la basura marina para responder cuestiones tan trascendentes sobre dónde se acumulan, hacia dónde se transportan

y que probabilidad presenta un tramo de costa de que sea contaminada por basura marina, los cuales se alimentan fundamentalmente de datos meteocéánicos que respondan a la escala de trabajo que se plantee en el marco de un estudio investigativo.

### **1.1.3. La problemática de la basura marina en Costa Rica: Parque Nacional del Corcovado**

En la actualidad playa Llorona, atractivo turístico de suma importancia en el Parque Nacional Corcovado – Costa Rica, se ha convertido en uno de los escenarios de la problemática de los desechos marinos, ya que en los últimos años se ha identificado la llegada de desechos (en su mayoría plásticos) a su línea costera convirtiéndola en un vertedero sin que se haya detectado específicamente el origen de los residuos. Tanto prensa escrita como visual<sup>2</sup> han alertado sobre dicho fenómeno promoviéndose campañas de limpieza para que en cierta medida se pueda ejecutar una acción. Derivado de este fenómeno de contaminación, el programa Caminos Sin Plásticos (<https://www.caminossinplastico.com/>) ha realizado desde el 2018 una serie de actividades en el Parque Nacional Corcovado entre las que se hallan las campañas de limpieza, propuestas de fortalecimiento de la gestión de desechos sólidos de la zona, toma de evidencia fotográfica y toma de muestras de los desechos en estos espacios (García-Barroso, 2018). Entre los recorridos que realizó Caminos sin plásticos, se halló la presencia de desechos en senderos y quebradas del parque, además de basuras en las playas de donde se hace mención al arrastre por corrientes, mareas y posterior depósito y acumulación en esas zonas (García-Barroso, 2018). El grupo en mención documentó fotográficamente la acumulación y depósito por períodos prolongados de la basura marina (Figura 10), constituida principalmente por plásticos.

<sup>2</sup> Según la revisión en buscadores web existen por parte de la prensa escrita noticias sobre campañas de limpieza realizadas en las playas del Corcovado; un reportaje realizado en el año 2019 muestra de manera visual cómo los desechos se encuentran acumulados en playa Llorona sin que se haya detectado a ciencia cierta su procedencia (González, 2019).



Figura 9: Registro fotográfico de la basura marina identificada en San Pedrillo, Parque Nacional Corcovado. Fuente: Caminos sin plástico, 2018

La caracterización de residuos realizada en San Pedrillo (Parque Nacional Corcovado) en donde de una muestra de 6,5 kg se encontró que el plástico tipo PET y PEAD lidera el porcentaje de materiales (Figura 10). Sin embargo no se ha determinado la proveniencia de estos materiales, ya que pueden provenir desde el interior continental a través de los cauces fluviales o desde fuentes marítimas.

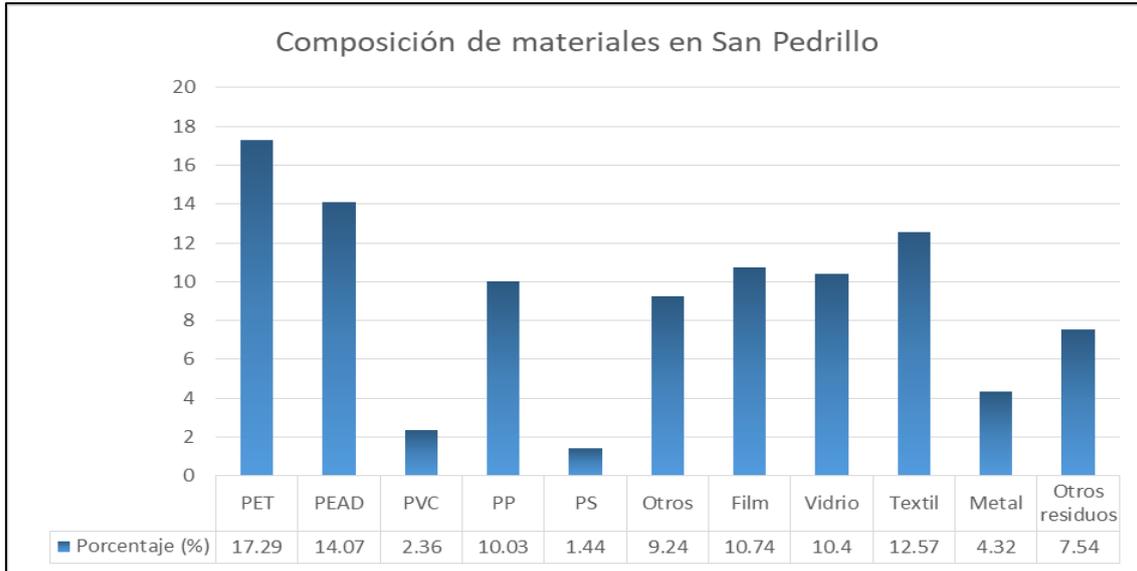


Figura 10: Porcentaje en peso de los desechos recogidos en San Pedrillo por Caminos Sin Plásticos. Fuente: (García-Barroso, 2018).

### El Parque Nacional Corcovado y su relación con el tráfico marítimo

Como antes se ha descrito, el origen de la basura marina procede tanto de la parte oceánica como de la parte continental, teniendo como emisores a las actividades antrópicas que se desarrollan en ambos medios. Aterrizando en el medio marino, una de las actividades socioeconómicas más importantes que se desarrolla es el transporte comercial de bienes a través de navíos, de lo cual, según la literatura científica disponible, es uno de los aportantes de basura marina hacia las costas.

Es preciso resaltar que Costa Rica es país aledaño de Panamá y por tanto va a estar próximo a la densidad de tráfico marítimo que se dirige hacia el canal del segundo país en mención, por ende, no es de extrañar que el Parque Nacional Corcovado que está muy próximo al país vecino, tenga bastante proximidad hacia las rutas de alto tráfico naviero (Figura 11).

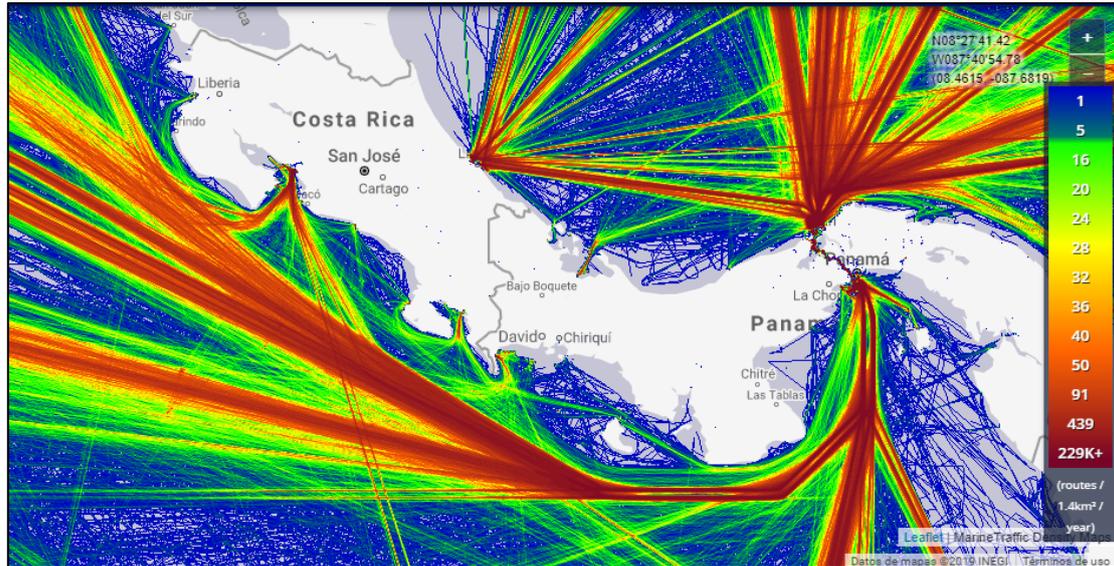


Figura 11: Densidad de tráfico marítimo hacia el canal de Panamá. Fuente: Marine Traffic ([www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com))

Asumiendo que dada la cercanía que existe entre el Parque Nacional Corcovado y la densidad del tráfico marítimo comercial hacia el canal de Panamá, un aporte de basura marina hacia este territorio es probable que proceda desde esta actividad.

Por tanto, para dar una primera aproximación de la respuesta sobre dónde se origina parte de la basura marina que arriba al Parque Nacional Corcovado, específicamente sitios como Playa Llorona, se desarrollará una metodología para determinar la probabilidad de contaminación por basura marina derivada del transporte marítimo aplicándose en la región protegida en mención. Con lo antes expuesto se fundamentará el presente Trabajo de Fin de Master, como requisito para la obtención del Máster Oficial en Gestión Integrada en Sistemas Hídricos.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. GENERAL

- Desarrollar una metodología para calcular la probabilidad de contaminación en la costa por basuras marinas derivadas del transporte marítimo con su aplicación en el Parque Nacional Corcovado, Costa Rica.

### 1.2.2. ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos se plantean desde dos puntos de vista a abordar el presente trabajo: desde el punto de vista metodológico y desde el punto de vista de la problemática.

- Metodológicos:
  - Definir la escala espacial y temporal para el análisis a realizarse.
  - Analizar la sensibilidad del modelo numérico de transporte a la malla de cálculo y número de partículas.
  - Analizar la sensibilidad del método de Monte Carlo al número de escenarios seleccionados.
  - Realizar la simulación de Montecarlo para la obtención de una base de datos de trayectorias de transporte de las basuras marinas en un número  $N$  de escenarios estadísticamente representativos.
- Problemática:
  - Analizar las rutas marítimas en la zona de estudio e identificar las fuentes emisoras de basura marina que se deriven del transporte marítimo.
  - Determinar la probabilidad de contaminación de la costa de Costa Rica por basuras marinas provenientes de fuentes emisoras derivadas del transporte marítimo.
  - Calcular la cantidad en términos de porcentaje de la basura marina que llegaría en las costas desde fuentes emisoras marítimas.
  - Precisar de qué fuente emisora marítima es más probable que arribe basura marina en Costa Rica con énfasis al Parque Nacional Corcovado.
  - Determinar el tiempo aproximado en que tardaría en arribar la basura marina al Parque Nacional Corcovado desde cada fuente emisora.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO



Figura 12: Área de estudio. Elaboración propia.

El área de estudio comprende a la línea de costa de Costa Rica a escala regional y el Parque Nacional Corcovado a escala local, los cuales están limitados por el Océano Pacífico (Figura 12).

Costa Rica es un país ubicado entre los países de Nicaragua y Panamá en América Central, limitando al este con el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico con una superficie de 51.000 km<sup>2</sup>. Se sitúa entre las latitudes 8° a 11° norte y -82° a -86° este según el sistema geográfico de referencia mundial WGS 84. La longitud comprende 1016 km en la costa pacífica, la cual es geográficamente accidentada teniendo golfos en Nicoya y la Osa, penínsulas y bahías.

Esta nación se caracteriza por poseer una gran diversidad de fauna y flora característica de las zonas tropicales además de la ubicación geográfica que sirve de puente entre América del Norte y América del Sur. Aproximadamente el 25% de su territorio está protegido bajo distintas figuras administradas como zonas para interés de conservación. El territorio se compone por una variedad de zonas como llanuras, valles, zonas costeras, espacios volcánicos y al encontrarse entre dos océanos da lugar a condiciones climáticas que influencia la configuración boscosa y biodiversa del país (Rojas, López, Morales, & Durán, 2015).

Costa Rica es conocido a nivel mundial por ser un referente en el turismo sostenible, además de enfocar sus políticas en la conservación de su naturaleza y buscar opciones cada vez más “verdes” para el desarrollo de la nación mediante el uso de estrategias orientadas a la administración efectiva de sus recursos naturales (MINAE, CONAGEBIO, & SINAC, 2016). El turismo es una de las actividades que más aportan a la economía del país, donde, de acuerdo a

los datos del Plan Nacional de Desarrollo Turístico de Costa Rica, las divisas percibidas por el turismo se calculan en torno a los 2 849 millones de dólares en el año 2015 (Instituto Costarricense de Turismo, 2017) cuyo atractivo principal son las áreas protegidas en buen estado de conservación.

El Parque Nacional Corcovado, administrado como área protegida por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación, SINAC, es conocida como un punto de alta biodiversidad, en la cual se registra aproximadamente un tercio de las especies de árboles de Costa Rica además de la mitad de especies en estado de amenaza (Bixby, Maldonado, & Bonilla, 2002). Esta región registra aproximadamente 375 especies de aves, 124 especies de mamíferos, 40 especies de peces de agua dulce, 8000 de insectos, 71 especies de reptiles y 46 especies de anfibios, representando entre el 30% al 50% de especies en Costa Rica (Bixby et al., 2002). Debido a su aislamiento con otras zonas boscosas se toma especial importancia en su protección (Bixby et al., 2002) dando lugar al Parque Nacional Corcovado como zona protegida, el segundo parque nacional más grande del país con una extensión inicial de 34.346 hectáreas (Vaughan, 1981); sin embargo en la actualidad representa un área de 42.570 ha terrestres y 5.375 ha marinas (500 m a partir de la línea de costa) (SINAC, 2014). El bosque del parque es de tipo tropical húmedo constituido por al menos quince comunidades vegetales siendo por ello una de las más diversas en fauna y flora del planeta, teniéndose aves marinas como fregatas y pelícanos, jaguares, tortugas, entre otras especies, incluyéndose avistamiento de ballenas y delfines (Vaughan, 1981).

Debido a su aislamiento e inaccesibilidad el proceso de asentamientos en el área fue muy lenta (Vaughan, 1981). En la actualidad existen pequeños núcleos rurales en las periferias del parque nacional en la península de la Osa. El área cuenta con una variedad de ecosistemas que incluyen bosques, playas, arrecifes de coral, manglares y pantanos de agua dulce (SINAC, 2014). Este punto de Costa Rica se ha convertido en un destino turístico nacional de gran importancia además de que en sus periferias existen grupos de servicios de modo que se lo puede considerar como un eje socioeconómico de la región. Las playas del parque nacional forman parte de los atractivos principales entre los diversos espacios que oferta para ese fin, siendo la playa la Llorona uno de los senderos que se ofertan en las visitas realizadas en esta área (SINAC, 2014).

### 3. MATERIALES

#### 3.1. DATOS ESPACIALES

A fin de tener un criterio de definición del dominio de trabajo, la determinación de tramos receptores y las fuentes emisoras de basura marina se realiza una compilación de la información espacial disponible de libre acceso. Entre los mismos se encuentran las rutas marítimas más transitadas (Halpern et al., 2008) que en el caso concreto del presente trabajo comprende la ruta comercial hacia el canal de Panamá. En la Tabla 2 se especifica la resolución de la información espacial tomada y procesada para los fines del presente trabajo.

Tabla 2: Detalle de información espacial utilizada

Nombre	Descripción	Fuente	Tipo	Escala / Resolución	Dátum
Raw_shipping_2008 <sup>3</sup>	Compilado de información sobre rutas marítimas a nivel mundial hasta el año 2008.	National Center for Ecological Analysis and Synthesis (NCEAS) UC Santa Barbara <a href="https://knb.ecoinformatics.org/view/doi:10.5063/F1S180FS">https://knb.ecoinformatics.org/view/doi:10.5063/F1S180FS</a> Proyecto “Global Map of Human Impact”	Raster	0.1°	WGS 1984 Mollweide
Áreas Silvestres Protegidas (pn_corcovado)	Constituye la información espacial referente a las áreas protegidas de Costa Rica entre las que se encuentran Parques Nacionales	SNIT – Infraestructura Nacional de Datos Espaciales de Costa Rica <a href="http://www.snitcr.go.cr/servicios_ogc_lista_capas?k=bm9kbzo6OQ==&amp;nombre=CENIGA">http://www.snitcr.go.cr/servicios_ogc_lista_capas?k=bm9kbzo6OQ==&amp;nombre=CENIGA</a>	Vector	s/i	CR05_CRT M05

Se ha procedido a utilizar información de investigaciones previas como es el compilado y procesado de la información espacial referente al tránsito marítimo, del cual, se vectorizó de acuerdo a los valores de cada píxel de la información raster, obteniéndose como resultado la representación de las frecuencias de tránsito entre 0 y 123 de acuerdo a la ruta del canal de Panamá<sup>4</sup>.

En lo que corresponde a la información espacial de las áreas protegidas de Costa Rica, según el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) el Parque Nacional Corcovado se

<sup>3</sup> Datos obtenidos en el proyecto de investigación “A global map of human impact on marine ecosystems” que fueron procesados durante 12 meses desde octubre de 2004 y posteriormente procesados de la base de datos “World Meteorological Organization Voluntary Observing Ships Scheme”; [http://www.vos.noaa.gov/vos\\_scheme.shtml](http://www.vos.noaa.gov/vos_scheme.shtml)” (Halpern et al., 2008).

<sup>4</sup> A fin de obtener la información de importancia se eliminaron los valores en escala de 0 a 6, dejando solo visibles las mayores a 7 de modo que se obtuvieran rutas más definidas y densas; es preciso indicar que la capa proviene de una información normalizada y procesada de bases datos crudas, por lo tanto los valores son referenciales para posteriormente dar criterios en probabilidades.

encuentra en el interior de la Península de la Osa, por lo que sus límites se encuentran entre el borde costero del mismo hacia el Pacífico hasta adentrarse en la península.

### 3.2. BASE DE DATOS MET-OCEAN

Según la información actualizada referente al movimiento de los plásticos en los océanos que ampliamente se ha detallado en el capítulo I, los forzamientos principales a los que se ve sometido el movimiento de las basuras marinas son las corrientes y los vientos en lo que respecta a mar abierto, dependiendo este último (viento) más de la densidad-flotabilidad del plástico en la superficie marina (Galgani et al., 2015). Para obtener los datos de forzamiento (Tabla 2), es decir, velocidad de corrientes como vientos se acudió a los datos Climate Forecast System Reanalysis (CSFR) en el período de 1979-2009 obtenidos por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). El CSFR fue obtenido como una base de datos de alta resolución que acoplan datos oceánicos, atmosféricos y terrestres en un período de 31 años para su uso en estimaciones<sup>5</sup>. Estos datos son horarios, cuyas velocidades tanto de corrientes como de vientos están descompuestas en velocidades horizontales (u) y verticales (v), además que según la NOAA su resolución se encuentra en torno a los 0.5° tanto en latitud como en longitud a escala planetaria. De los 10 productos obtenidos del CSFR se tomó al OCN-3D-Ocean Data para fines del presente trabajo.

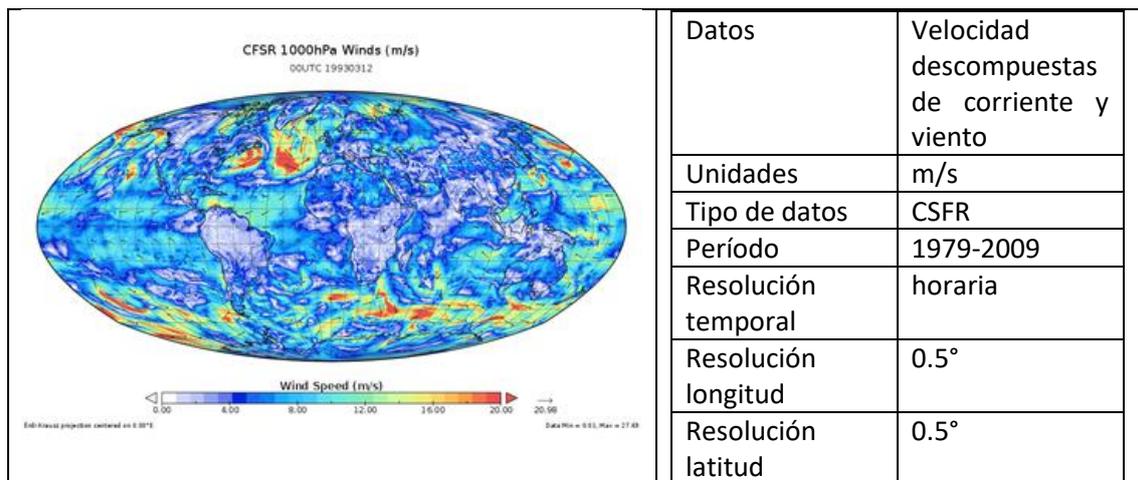


Figura 13: Información de la base de datos y representación espacial de las velocidades de viento en la superficie del 12 de marzo de 1993 con datos CSFR. Fuente: NOAA, 2019. ([https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2#CFS%20Reanalysis%20\(CFSR\)](https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2#CFS%20Reanalysis%20(CFSR)))

En lo que compete a corrientes se tomaron datos de velocidad en la superficie, los cuales se encuentran en datos horarios, agrupados en archivos tipos netCDF4 compilando la serie de datos en meses para cada año. Respecto a los vientos los datos tomados corresponden a las velocidades medias en la superficie dado que se requieren los forzamientos superficiales para la basura marina, los cuales al igual que las corrientes fueron agrupados en formato netCDF4 almacenándose la serie de datos en meses para cada año. Debido a que los formatos internos de datos fueron tomados con distinta configuración desde el año 2010 se toma la serie hasta el año 2009 a fin de facilitar la operatividad de simulación de escenarios que se detallará más adelante.

<sup>5</sup> Información ampliada en <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00765>.

### 3.3. MODELO NUMÉRICO DE TRANSPORTE

La herramienta a utilizar para el transporte de partículas es el modelo numérico TESEO desarrollado por IHCantabria (Abascal et al., 2007). El modelo TESEO es un modelo de numérico de transporte y degradación de hidrocarburos el cual, a más de estar enfocado hacia la parte hidrocarburífera, también considera el transporte de objetos flotantes y personas en el medio marino. El modelo de transporte de TESEO<sup>6</sup> se fundamenta en el modelo lagrangiano bidimensional el cual simula al transporte mediante la suma de partículas que se mueven de forma independiente, por efecto del viento, oleaje, corrientes y la difusión turbulenta (IH Cantabria, 2019). El modelo Lagrangiano resuelve la siguiente ecuación:

$$\frac{dx_i}{dt} = U_a(x_i, t) + U_d(x_i, t)$$

Donde:

- $x_i$  es la coordenada (x,y) de la partícula i
- $U_a$  es la velocidad advectiva de la partícula en esa coordenada, y
- $U_d$  es la velocidad difusiva

A su vez la velocidad de advección ( $U_a$ ) surge como la combinación lineal de la acción del viento, del oleaje y de las corrientes, siguiendo la siguiente expresión:

$$U_a(t) = U_c + C_H (U_H + C_D U_v)$$

Donde

- $U_c$  es la velocidad superficial de la corriente
- $U_H$  es la deriva de Stokes producida por el oleaje
- $U_v$  es la velocidad del viento a 10 m de la superficie
- $C_H$  es el coeficiente de arrastre del oleaje
- $C_D$  es el coeficiente de arrastre del viento

A su vez  $U_H$  se calcula como sigue:

$$U_H = \frac{gH}{8C}$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $H$  es la altura de ola significativa y  $C$  es la celeridad del tren de ondas. La velocidad turbulenta se obtiene mediante un proceso de Monte Carlo en el que la velocidad de difusión varía en el intervalo  $[-\vec{U}_d, \vec{U}_d]$  y se considera proporcional a los coeficientes de difusión (Instituto de Hidráulica Ambiental Universidad de Cantabria, 2016). En cada paso de tiempo, el desplazamiento difusivo aleatorio de una partícula se define como:

<sup>6</sup> La información que se detalla en este apartado se ha tomado del Manual del Usuario TESEO 1.2 del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

$$|\vec{U}_a| = \sqrt{\frac{6D}{\Delta t}}$$

Donde D es el coeficiente de difusión. El modelo de transporte ha sido validado y calibrado mediante la utilización de boyas de deriva lanzadas durante el accidente del Prestige y en diferentes ejercicios de lucha contra la contaminación realizados por Salvamento Marítimo (Abascal et al., 2009a; Abascal et al., 2009b).

Uno de los parámetros que son imprescindibles de ajustar para que el transporte refleje lo mejor posible a la influencia de los forzamientos sobre la basura marina son los que corresponden al coeficiente de arrastre (Cd) y coeficiente de difusión (D). El Cd<sup>7</sup> ha sido definido según las necesidades de trabajos de investigación realizados en referencia al transporte de basuras marinas en los océanos, en la cual, de acuerdo a lo indicado por (Pereiro, Souto, & Gago, 2018) el rango se ubica entre 0.005 a 0.012 lo cual coincide con otros estudios realizados; para plásticos más densos el Cd es menor ya que la velocidad del viento tiene poca influencia sobre su transporte, teniendo el efecto contrario para plásticos más livianos como el poliestireno o el polietileno de alta densidad en donde el valor corresponde a 0.012: este número se relaciona con el índice de flotabilidad del plástico (Yoon et al., 2010), por lo que para efectos del presente trabajo, se toma un valor de 0.01 asumiendo que el 100% de las partículas son plásticos flotantes con una ínfima superficie bajo el agua<sup>8</sup>.

En lo que respecta al coeficiente de difusión (D)<sup>9</sup>, la American Society of Civil Engineers (ASCE) indica un rango de 1 a 100 m<sup>2</sup>/s que depende en gran parte de la localización de las partículas en el medio, es decir, que para aguas de transición el valor es mucho menor que para aguas abiertas (ASCE, 1996). Diversos estudios obtienen este valor a través de la metodología “camino aleatorio” (Liubartseva, Coppini, Lecci, & Creti, 2016), mientras que otros autores proponen valores fijos que dependen en gran medida del lugar en donde se desarrolla el trabajo de investigación (Critchell et al., 2015). Para el presente trabajo se toma un valor de 50m<sup>2</sup>/s ya que si bien se consideran aguas abiertas, éstas fuentes no se encuentran extremadamente distantes de la plataforma continental (145km aproximadamente).

Como simplificaciones adicionales al presente trabajo se asume que el plástico no sufre procesos de degradación por factores físico-químicos, que tienen todas las partículas la misma densidad, y que en el arribo mantienen las mismas condiciones físico-químicas que en el vertido.

<sup>7</sup> El Cd o coeficiente de arrastre hace referencia sobre en qué porcentaje tiene influencia la velocidad de viento en el transporte de la partícula sobre la superficie marina para el componente advectivo de la ecuación de transporte.

<sup>8</sup> Se asume un 100% de las partículas que sean flotante a efectos de simplificación operativa ya que simular a las mismas bajo distintas condiciones de Cd en función de la densidad del plástico supone un mayor esfuerzo computacional (aumento de escenarios), lo cual sería lo adecuado en caso de profundizar el presente trabajo.

<sup>9</sup> El coeficiente de difusión (D) está relacionado al grado de esparcimiento que tendrían cada una de las partículas sobre la superficie marina.

## 4. MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico del presente trabajo es el que pretende dar sistemáticamente las pautas para determinar los objetivos planteados, el cual, a través del uso de los recursos indicados en el capítulo de materiales, generará como producto el aspecto probabilístico de la contaminación por basura marina en el Parque Nacional Corcovado, Costa Rica. A continuación se presenta el macro esquema planteado a seguir (Figura 14):

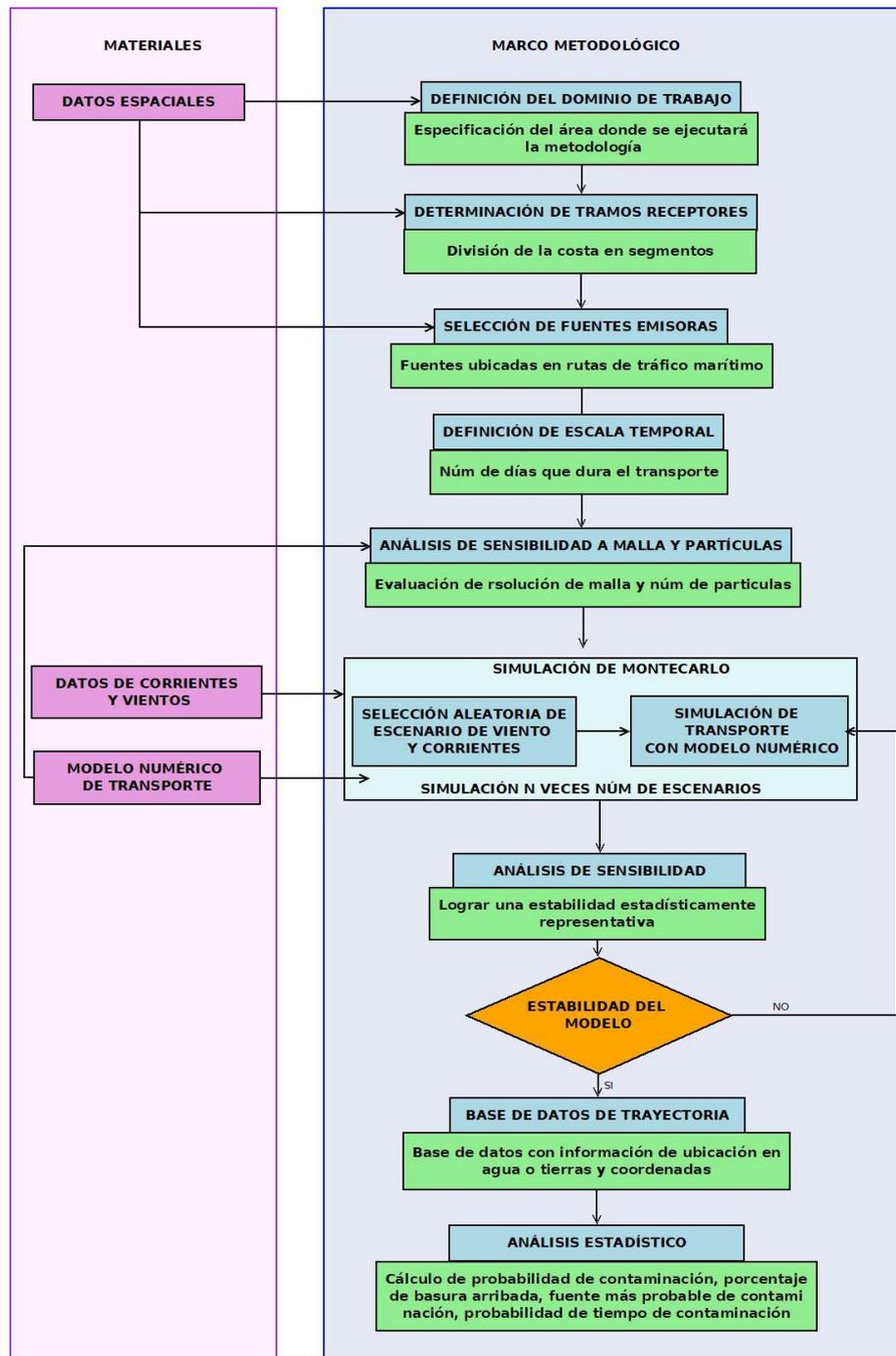


Figura 14: Marco metodológico para el cálculo de probabilidad de contaminación. Elaboración propia.

#### 4.1. DEFINICIÓN DEL DOMINIO DE TRABAJO

La definición de la escala trabajo (Figura 15) para el presente documento va a estar dado por el criterio de dónde se desea focalizar el análisis, que para el caso pertinente es el Parque

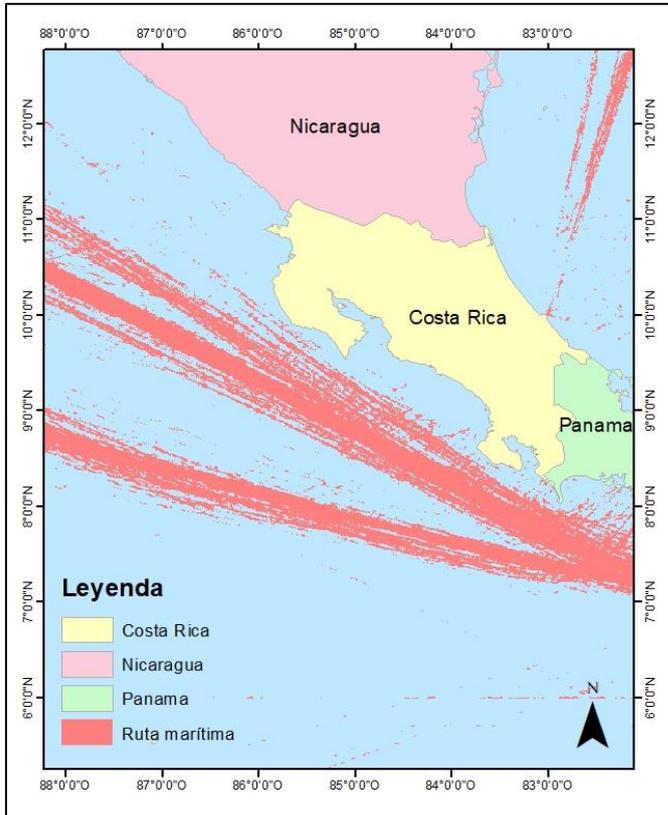


Figura 15: Dominio espacial de trabajo. Elaboración propia.

Nacional Corcovado, sin embargo no se debe descartar el arribo basura marina a distintos puntos del perfil costero de Costa Rica, lo cual da un panorama más integral de lo que pueda suceder a nivel regional. Otro criterio a considerar es la resolución de los datos de forzamiento, que en el caso concreto de la región es de 0.5° correspondientes a aproximadamente 50 km. Sin embargo debido a la incertidumbre del comportamiento del transporte de las partículas en relación a la zona continental americana, se procede a fijar el marco de trabajo entre Nicaragua y Panamá, incluyendo el detalle de segmentación del perfil de Costa Rica en lo que respecta a la latitud.

En lo que concierne al espacio longitudinal, el análisis pretende centrarse en asumir a las rutas

marítimas hacia el canal de Panamá como las fuentes de basuras que derivan en la costa de Costa Rica (hipótesis planteada) por lo que la limitación estará dada por el paso de las rutas frente al país en mención con un margen más amplio para el transporte de basura que se ubiquen lejos de la costa.

## 4.2. DETERMINACIÓN DE TRAMOS RECEPTORES

Partiendo de la premisa en que se inicia con un análisis regional para aterrizar a uno a nivel local, se fragmentó el perfil costero en segmentos de 50km mediante el uso del software ESRI Arc Gis; con este procedimiento se obtuvieron 15 secciones desde el inicio del perfil costanero del país hasta su frontera con Panamá, además de que en localizaciones que tenían accidentes geográficos como golfos se las zonificaron como un solo segmento (Figura 16 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), ubicándose por tanto el lugar objeto de estudio en el segmento 13.

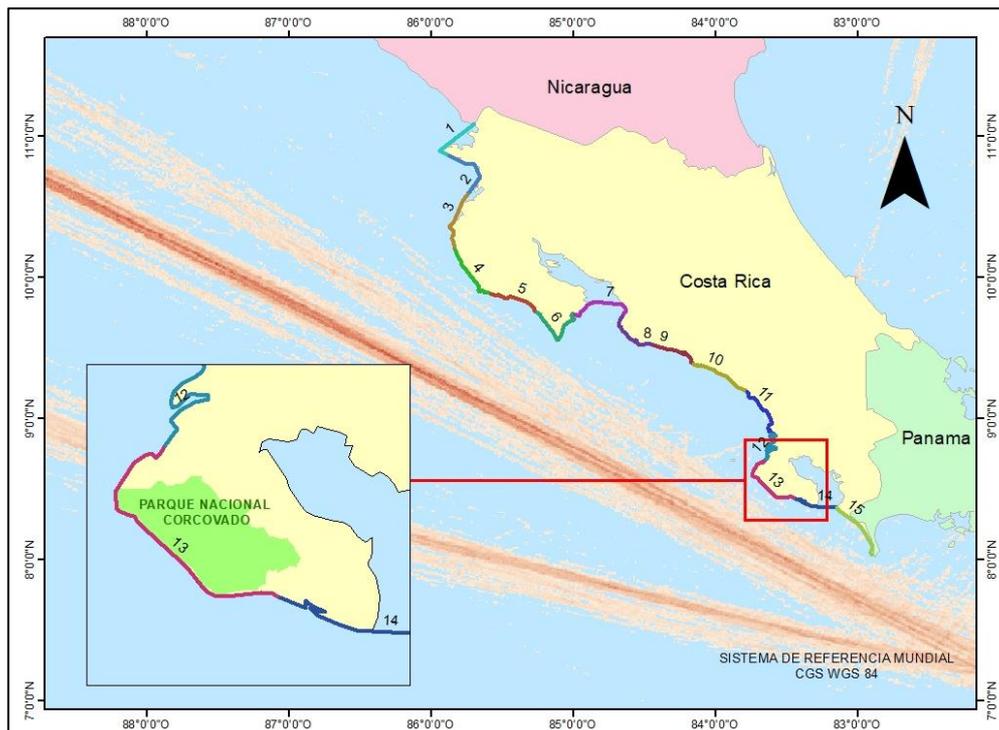


Figura 16: Segmentación del perfil costanero de Costa Rica y ubicación de ruta de navegación (línea roja).  
Elaboración propia.

## 4.3. SELECCIÓN DE FUENTES EMISORAS

Para la determinación de las fuentes emisoras de basura marina se acude a la información espacial disponible. Entre los mismos, tal como se han descrito en los trabajos de Lebreton, Carlson y Janbeck, están las rutas marítimas más transitadas (Halpern et al., 2008) que en el caso concreto del presente trabajo comprende la ruta comercial hacia el canal de Panamá.

Partiendo del criterio de la ubicación espacial de las rutas marítimas en relación con el área de estudio, se seleccionan las fuentes emisoras que tengan una representación a nivel regional del perfil costero de Costa Rica, es decir, que abarquen espacialmente a este territorio. Se seleccionaron 5 fuentes (Figura 17) en función de su representatividad en la costa y el esfuerzo computacional que se requiere a la hora de simular el transporte.

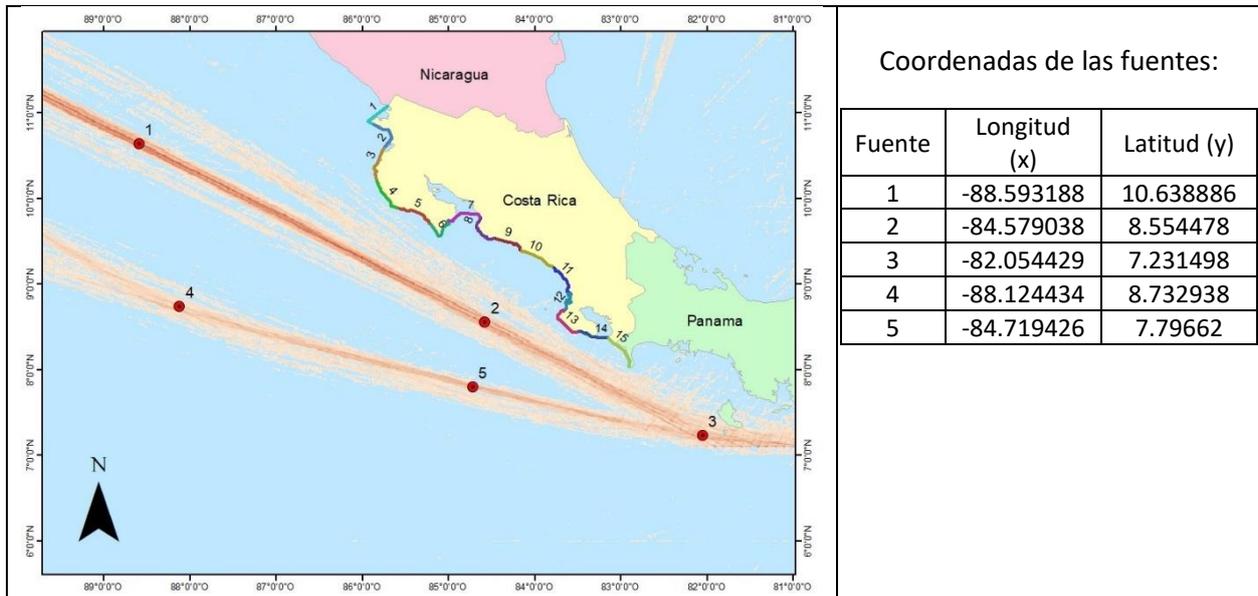


Figura 17: Fuentes emisoras de basura marina. Elaboración propia.

La fuente emisora 1 está enfocada a detectar la probabilidad del arribo de partículas a la costa desde un punto alejado de Costa Rica pero que al mismo tiempo se ubique dentro de la trayectoria comercial; la fuente emisora 2 se centra en la ruta principal pero que a la misma vez se ubique en un punto aproximado a la zona del Parque Nacional El Corcovado; la fuente emisora 3 se ubica en la confluencia de ambas rutas, cuya trayectoria se dirige hacia el canal de Panamá el cual tiene como objetivo ver la probabilidad de arribo desde este punto de convergencia de especial importancia comercial. Las fuentes emisoras 4 y 5 están enfocadas en la ruta comercial secundaria en aras de medir la probabilidad de arribo desde la misma como una zona más alejada de la costa.

#### 4.4. DEFINICIÓN DE ESCALA TEMPORAL

En los casos que se reportan que la basura marina se transporta a tierra (costa) están determinados también por el tiempo en que tardan en desplazarse, ya que depende de las condiciones de los forzamientos para que éste se produzca de manera más “veloz” o en su defecto sea menor, sin embargo, también estará condicionado por la distancia respecto a la fuente emisora. Debido a que la ruta marítima secundaria que es la que más dista de la costa, se encuentra a aproximadamente a 145 km, se coloca una fuente a esta distancia para determinar en qué tiempo arriba tomándose dos escenarios aleatorios de velocidad de corriente y viento que puedan transportar la basura hacia la costa.

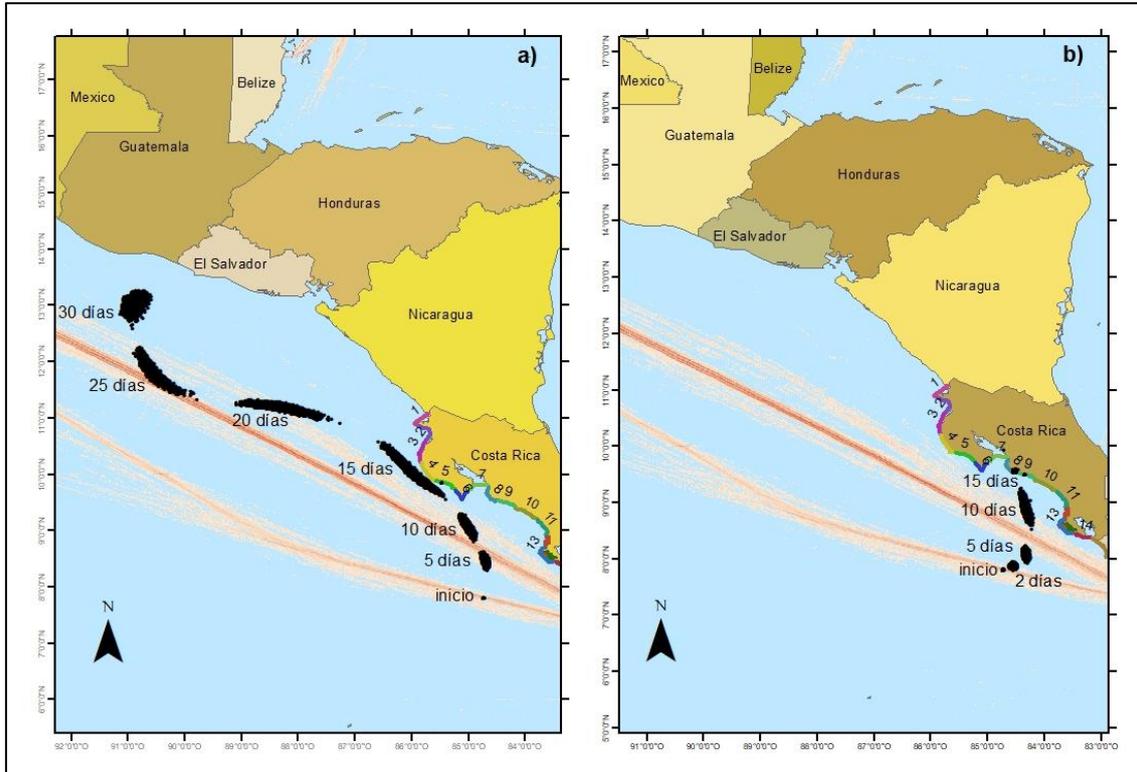


Figura 18: Transporte de partículas en distintos períodos de tiempo. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 18, en el gráfico a) los forzamientos (velocidad de corrientes y vientos del 07 de febrero de 2002) dirigen la basura marina hacia los países del norte de Centroamérica dejando a su paso basura en la costa de la zona 5 de Costa Rica, sin embargo, con 30 días el efecto del desplazamiento continúa; en 20 días ya es posible saber cuánta basura marina queda retenida en la costa mientras las otras continúan moviéndose. En el caso del gráfico b) el arribo es mucho más rápido, lo cual se debe a los efectos de los forzamientos en el mismo (velocidad de corrientes y vientos del 02 de marzo de 2008) por lo que en 15 días se considera suficiente para arribar en costa. Por tanto, de acuerdo a lo arrojado por la Figura 18, es preferible tomar 30 días como escala temporal ya que dentro de este lapso hay más amplitud para determinar el fenómeno de transporte en cada escenario ya sea que exista arribo o no, además que se considera que es umbral suficiente para el análisis. En el trabajo de Abascal y colaboradores en el año 2010, se emplea esta misma escala temporal para fuentes que proceden de mar abierto y que vaya dirigida hacia la costa.

## 4.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE RESOLUCIÓN DE MALLA Y NÚMERO DE PARTÍCULAS

### 4.5.1. Resolución de la malla de trabajo

Una de las entradas imprescindibles para el funcionamiento del modelo numérico de transporte TESEO es la malla de trabajo del área en donde se va a simular el cómo se comportaran las partículas en relación a los forzamientos de viento y corrientes, por lo que la propuesta inicial de resolución se plantea en 50 km tanto en latitud como en longitud debido a que se relaciona con la resolución de los datos mete-oceánicos. Sin embargo, al ubicar la malla en el espacio geográfico de trabajo se pudo observar que poseía bastante lejanía respecto a la costa en la zona terrestre (Figura 19), por lo que se optó reducirla a una resolución de 20 km tanto en longitud como latitud, obteniéndose un acercamiento bastante apto en cuanto al perfil costero.

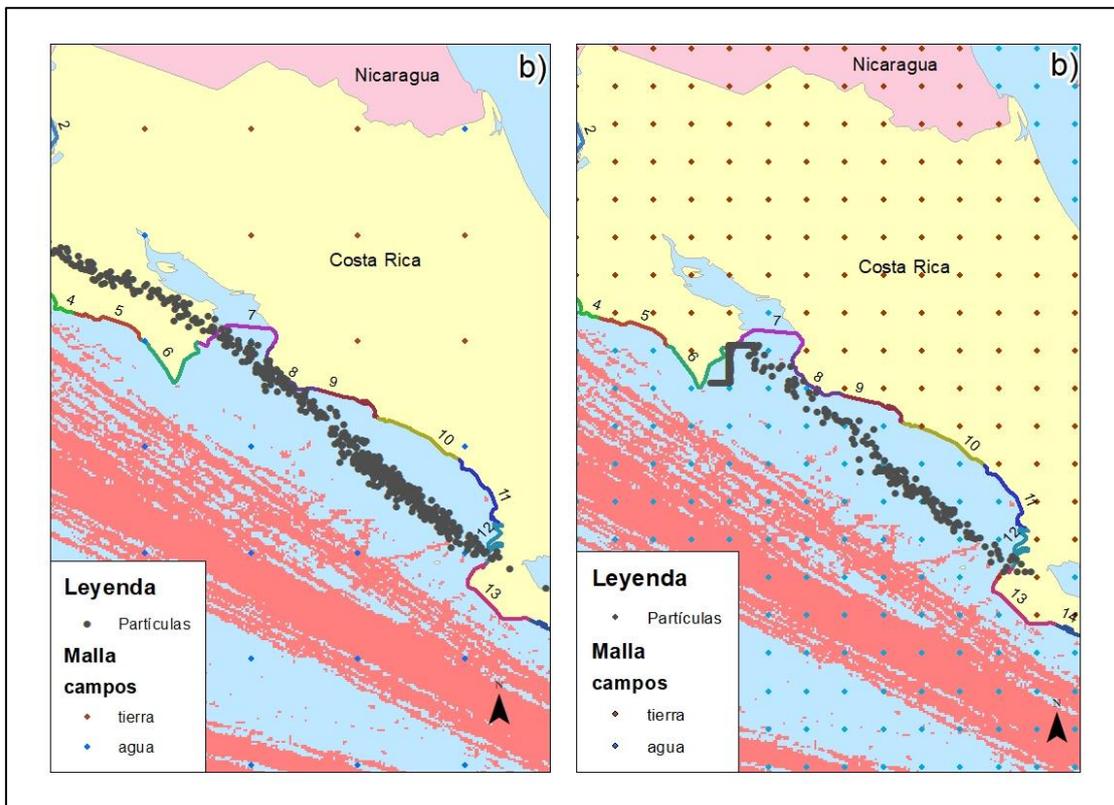


Figura 19: Transporte de basura sobre mallas de distinta resolución. Elaboración propia. Nótese que el transporte en la figura a) pasa sobre “tierra” debido a que los valores registran agua dada su resolución, siendo totalmente distinto en la figura b) en donde son retenidas en los puntos “terrestres” más próximos, teniendo una trayectoria más precisa en el transporte.

Para constatar las diferencias que pudieran presentarse en ambas mallas, se decidió simular el transporte de basura marina hacia la costa en un escenario específico aleatorio (condiciones meteoceánicas del 05 de abril de 1986 al 05 de mayo de 1986)<sup>10</sup> pudiéndose observar diferencias respecto al arribo de las mismas (Figura 19), siendo en la malla más grosera (50 km) una

<sup>10</sup> En el apartado de selección de escenarios se explicó con mayor detalle la toma aleatoria de los escenarios.

introducción de las partículas por sobre la zona de Punta Arenas ya que la malla aún lo reconoce como “agua”, mientras que en la malla más fina de 20 km el adentramiento se registró hasta en aproximadamente 9 km en la zona de llegada, siendo visualmente más idóneo para el análisis, por lo que se toma a la resolución de 20 km como la malla a considerarse en la configuración del modelo de transporte.

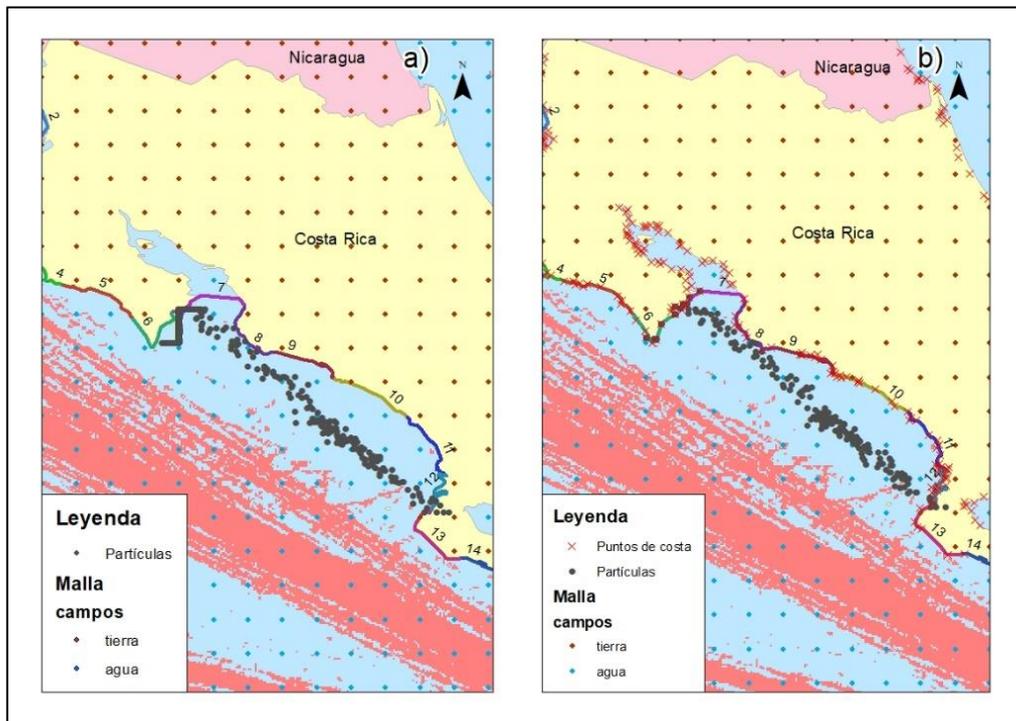


Figura 20: Representación de la adherencia de las partículas a la costa en una malla de 20km de resolución. Elaboración propia. Nótese que con la adhesión a costa las partículas tienen un comportamiento más “suave” en su transporte hacia el punto de arribo.

Dado que basura marina ingresa hasta el punto más próximo a tierra que corresponda en la malla, se incluye en la configuración de TESEO que en el arribo se coloquen en la costa, de modo que no se ingrese a la parte terrestre a efectos de visualización que puedan arrojar resultados más aproximados a un escenario real<sup>11</sup>. (Figura 20). Es preciso indicar que la extensión de la malla está acorde a la escala espacial indicada en el apartado anterior.

#### 4.5.2. Número de partículas

El número de partículas es lo que viene a representar a las unidades e basura marina en el modelo numérico de transporte. Según trabajos previos en torno al transporte de basuras marinas en mar abierto, el número de partículas ha sido establecido bajo diversos criterios. En el trabajo realizado por (Liubartseva et al., 2016) en el mar Adriático se basaron en datos anteriores sobre las cantidades de basura marina estimadas en su respectivo espacio de trabajo para establecer el número de partículas, sin embargo, acorde a su mismo trabajo, en los modelamientos realizados para el Pacífico Sur no se han ofrecido detalles del número de partículas lanzadas ya que en esta área los datos son escasos en cuanto al transporte de basura

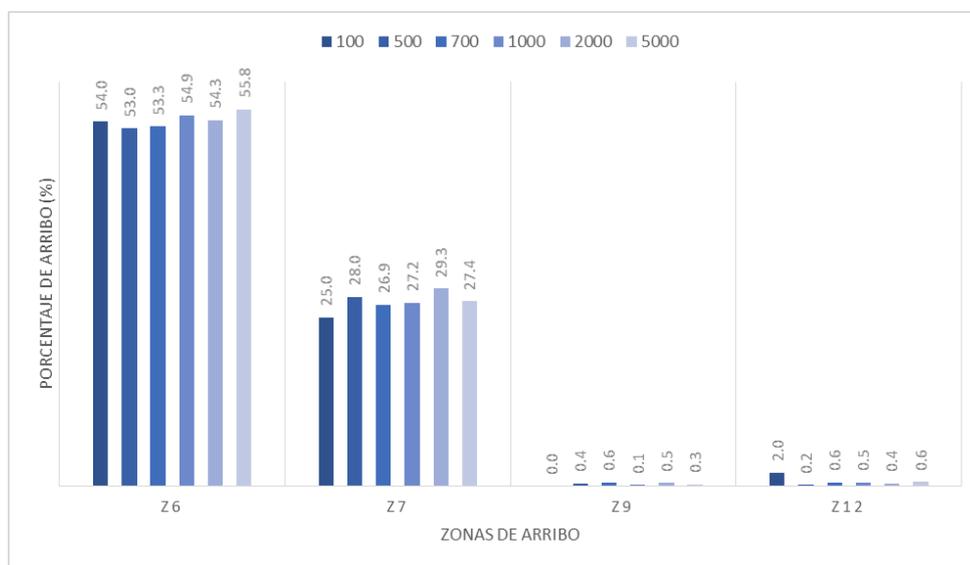
<sup>11</sup> Se detallará más el parámetro de adherencia a costa en el apartado de Configuración de TESEO.



marina. En otro artículo de (Abascal et. al., 2010) se estableció el número a partir del estudio de su variabilidad usando distintos valores de partículas en incremento, teniendo un óptimo de 1000 en los resultados de arribo en el modelo de transporte de hidrocarburo.

Con base en lo descrito en el párrafo anterior se procedió a realizar para la zona de estudio en concreto la simulación con un escenario específico aleatorio (condiciones meteoceánicas del 05 de abril de 1986 al 05 de mayo de 1986) de transporte con distintos números de partículas: 100, 500, 750, 1000 y 2000 de los cuales, se decidió obtener el porcentaje de partículas que arriban las zonas costeras segmentadas además de alteraciones en la trayectoria del transporte en caso de haberlas.

Gráfico No. 1: Valores de arribo según el número de partículas



Como se puede observar en el Gráfico No. 1, la variación que se da en el porcentaje de llegada a cada zona en función del aumento de partículas presenta muy poca variabilidad o diferencia a medida que se adiciona el número de las mismas, por lo que aplicar un número a partir de 1000 resulta adecuado de acuerdo a lo descrito.

Al graficar las trayectorias seguidas por determinado número de partículas el comportamiento sigue siendo el mismo, ya que prevalecen los forzamientos para transportar a las mismas por lo que no incide en el arribo en determinados segmentos la cantidad de elementos lanzados, tan solo cambiando la densidad de en número de partículas, siendo más robusta la trayectoria desde las 1000 partículas (Figura 21).

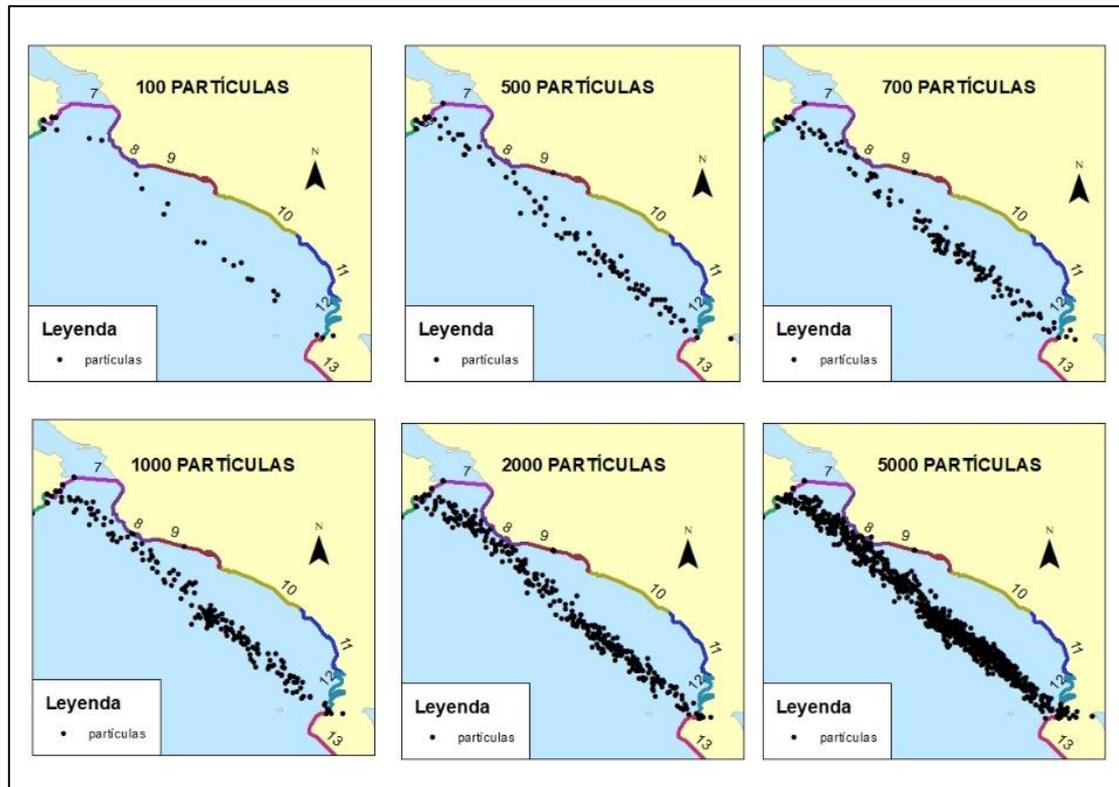


Figura 21: Trayectoria de partículas en distintos tipos de cantidades. Elaboración propia.

De acuerdo al citado trabajo de Abascal et. al., mientras más se aumenta el número de partículas, más esfuerzo computacional va a requerirse, siendo efectivamente más alto en 2000 y 5000 partículas simuladas para efectos del análisis, sin embargo, apoyándose en lo realizado por la autora en mención y según lo determinado en las variabilidades, se considera oportuno utilizar 1000 partículas.

## 4.6. SIMULACIÓN DE MONTECARLO

La simulación del fenómeno de transporte utilizando el método de Montecarlo, para el presente trabajo, consiste en conformar un escenario aleatoriamente a partir de una fecha inmersa en el período de los datos de forzamiento (corrientes y vientos) y realizar la simulación de trayectoria de la basura marina con el modelo numérico de transporte TESEO, de modo que el resultado que se obtenga, pueda ser evaluado en términos probabilísticos; el número de veces que se realice este proceso de simulación dependerá en buena medida del número de escenarios que se plantee el cual deberá ser estadísticamente representativo de la base de datos histórica meteoceánica. A continuación se ofrece el detalle del procedimiento realizado.

### 4.6.1. Conformación aleatoria de escenarios meteoceánicos

La conformación de los escenarios de velocidades de corrientes y vientos es utilizando el método de Montecarlo, es decir, tomar aleatoriamente los datos a partir de un conjunto de los mismos. Este método fue concebido para seleccionar muestras aleatorias de una población (finita o infinita) de la que se conoce su distribución de probabilidad mediante números aleatorios (Peña, 2001). Estos números aleatorios poseen la misma probabilidad de aparición (Peña, 2001).

Para la selección de los escenarios de velocidades de corrientes y vientos en el período de los datos comprendidos entre el 01 de enero de 1979 y el 31 de diciembre de 2009, se utilizó la librería “random”<sup>12</sup> del lenguaje de programación Python versión 3.7. Este módulo genera números aleatorios comprendidos dentro de un conjunto o rango de valores que se especifica en su codificación, el cual en el presente caso se sitúa desde el inicio hasta el final del período de la base de datos disponible para el presente trabajo. El número de valores aleatorios que tome el módulo depende del número de escenarios con el que se quiere trabajar; explicado a modo de ejemplo: si se decide a realizar una simulación con 100 escenarios de viento y corrientes, lo que hará “random” es tomar 100 fechas aleatorias entre los años 1979-2009 y extraerá los datos correspondientes a esas 100 fechas. Los escenarios que se conformen son los que se proceden a simular el transporte.

### 4.6.2. Simulación de transporte de basura marina con el modelo numérico

Conforme lo descrito en el acápite de 3.3. sobre el funcionamiento del modelo numérico de TESEO, lo siguiente es nutrirlo con los escenarios conformados en el procedimiento anterior, por lo que mediante una codificación con el lenguaje de programación Python 3.7 se lanza automáticamente el modelo con cada escenario aleatorio. Para que el modelo de transporte simule las condiciones que se precisan en el presente documento, se realiza su previa configuración (Figura 22), colocando un coeficiente de arrastre de 0.001 y un coeficiente de difusión de 50 m<sup>2</sup>/s, 1000 número de partículas y 30 días de simulación.

<sup>12</sup> El módulo “random” de Python utiliza el algoritmo Mersenne twister para la generación de números aleatorios ya que ha sido ampliamente probado; una explicación más detallada se puede encontrar en: <https://docs.python.org/3/library/random.html>. Es más propio hablar de números pseudo-aleatorios ya que están determinados por una “semilla” que viene a ser el período de los datos (fecha inicial), sin embargo tienen la propiedad de la equiprobabilidad de aparición (Peña, 2001). Más información sobre métodos de Montecarlo con Python se pueden encontrar en: <https://towardsdatascience.com/monte-carlo-simulations-with-python-part-1-f5627b7d60b0>; <https://towardsdatascience.com/monte-carlo-simulations-with-python-part-1-f5627b7d60b0>.

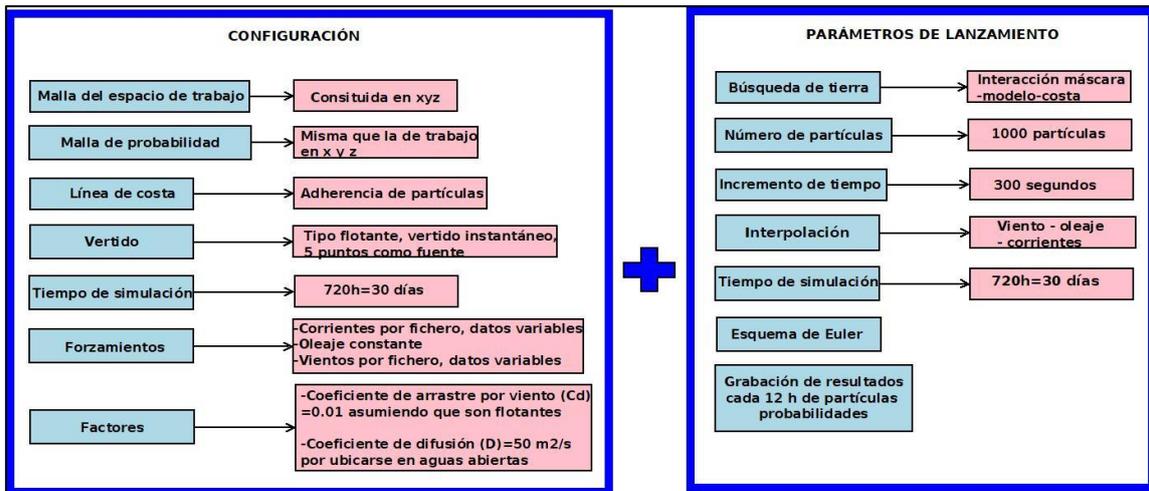


Figura 22: Esquema de configuración de TESEO. Elaboración propia.

El incremento de tiempo se relaciona con el lapso que los datos van a ser procesados, por lo que si se utiliza un paso muy prolongado se puede incurrir en que la partícula no aproveche cada cuadrícula de velocidad (Abascal et al., 2010) pero en el caso contrario, si es muy fino, es probable que necesite mucho esfuerzo computacional, por tanto se propone el uso de un paso de tiempo de 300 s para asegurar que tome todos los campos de velocidad.

Los resultados se deciden grabar cada 12h ya que al tener un tiempo de simulación de 30 días es pertinente adoptar la visualización de resultados de manera más prolongada con el objetivo de reducir la ocupación física de archivos además de facilitar el pos-proceso de los mismos.

Una vez determinada la vía para programar la selección por aleatoriedad es necesario establecer el número de escenarios que se van a simular, a fin de determinar la probabilidad de contaminación. La obtención de este número se basa en un análisis de sensibilidad que se traduce en la variación de llegada de basura en la costa en función del número de escenarios simulados con el modelo numérico de transporte, en otras palabras: buscar el número adecuado de escenarios en donde se establezca el modelo y que sea estadísticamente representativo.

#### 4.6.3. Base de datos de trayectoria

La base de datos de trayectoria se obtiene con la simulación de Montecarlo en forma de ficheros que corresponden a la ubicación de la basura marina cada 12h hasta cumplir los 30 días. Esta base de datos ofrece información espacial como las coordenadas de cada partícula que representa una unidad de basura flotante y si se encuentra sobre la superficie marina o en la costa. Dada la magnitud de la misma, se recurre al uso del lenguaje de programación Python 3.7 para que de acuerdo a unas condicionales que representan a los segmentos de la costa del área de estudio, almacene en qué tramo receptor se aloja la basura que ha llegado a costa, de modo que permite manipular la base de datos hacia la obtención de los resultados buscados.



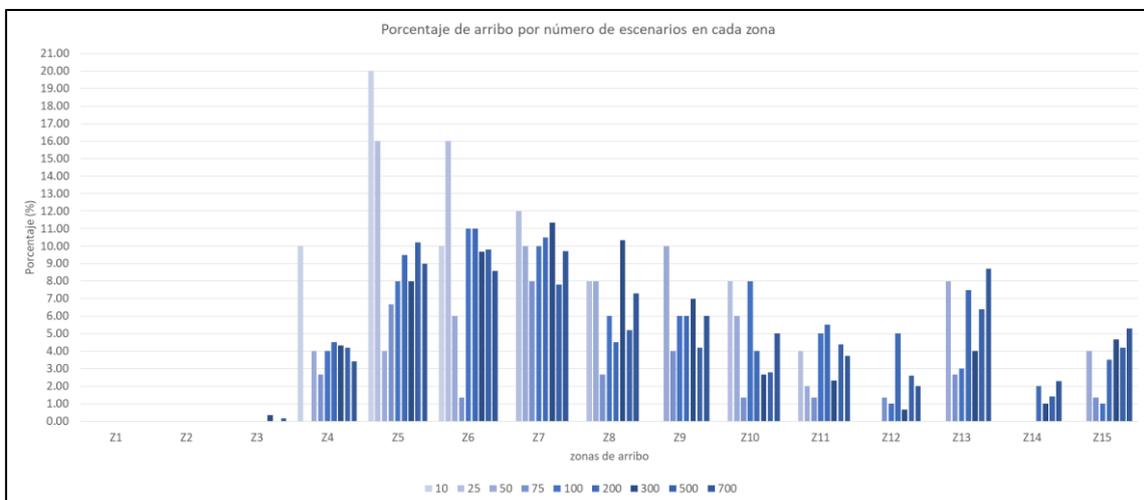
#### 4.6.4. Análisis de sensibilidad al número de escenarios

El análisis de sensibilidad está enfocado a analizar la variabilidad que existe en el modelo en determinado número de escenarios, con el objetivo de decidir qué valor es el óptimo para realizar el lanzamiento con las cinco fuentes emisoras propuestas de modo que sea estadísticamente representativa. La fuente emisora elegida para la realización del análisis de sensibilidad se situó entre las dos rutas marítimas frente al segmento correspondiente al Parque Nacional Corcovado, con coordenadas -84.969 longitud y 8.233 latitud.

A fin de realizar el análisis correspondiente, se parte con el post-proceso, es decir, que una vez realizada las simulaciones por cada grupo de escenarios se procede a identificar la probabilidad de llegada a la costa. A modo de ejemplo: en una simulación con 100 escenarios se pueden reportar 10 arribos de basura marina en la zona 13, 5 arribos en zona 10, y así sucesivamente. En el Anexo I se ofrece el detalle de los valores obtenidos además de otros gráficos derivados del análisis.

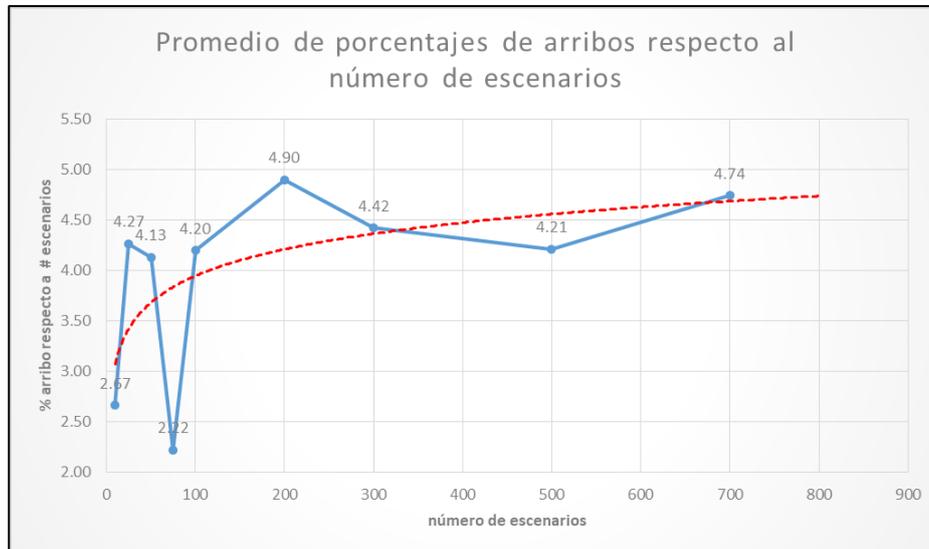
Representando espacialmente en un gráfico de barras (Gráfico No. 2) se puede visualizar a groso modo cómo se distribuyen las probabilidades por tramo receptor, facilitando la identificación de qué zonas registran mayor probabilidad de llegada de basura marina, además de cómo fluctúa ese valor en cada una según el número de escenarios simulados, teniendo una mayor variabilidad con números de escenarios menores a 100.

Gráfico No. 2: Porcentaje de arribo por número de escenarios en cada zona



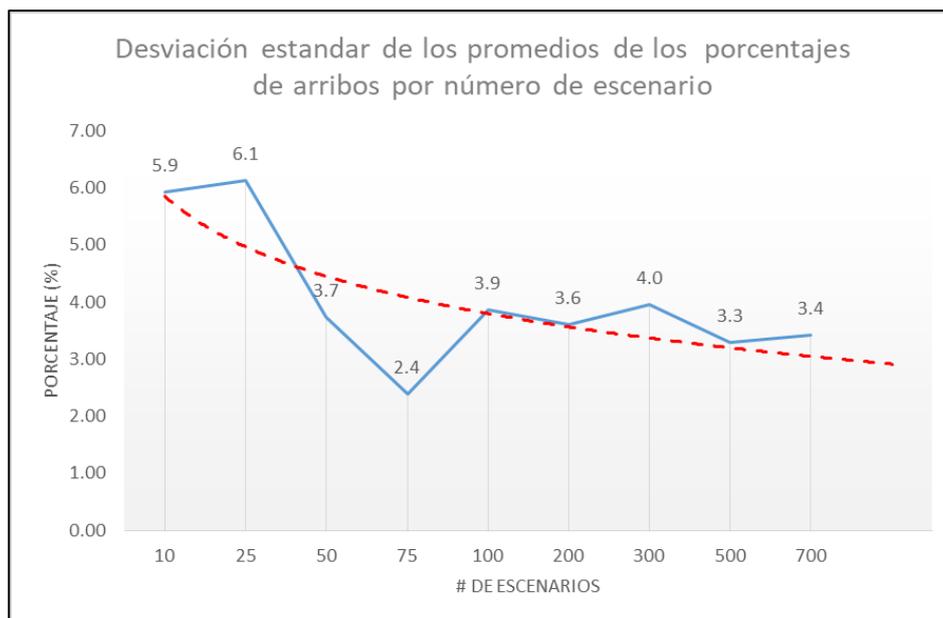
Una mejor manera de representar la variabilidad es agrupando los datos por número de escenario. De acuerdo a los valores ubicados en el Anexo I, se puede ver una muy buena aproximación entre la media y la mediana a partir de 100 escenarios por lo que se los decide agrupar según su promedio (Gráfico No. 3) de donde se denota que los valores son más próximos entre sí a medida que aumenta el número de escenarios.

Gráfico No. 3: Representación del promedio de los porcentajes de arribo respecto al número de escenarios



Calculando la desviación estándar como un factor estadístico indicativo de la variación en una distribución se puede observar que es muy poco fluctuante a partir de los 100 escenarios, presentando una tendencia proclive a la estabilización a partir de los 500 escenarios (desviaciones más aproximadas numéricamente) con una pendiente mucho más suave de la línea de tendencia (Gráfico No. 4). Hay que considerar que esta representación equivale a lo que sucede en la costa segmentada en general por ser valores promediados.

Gráfico No. 4: Representación de la desviación estándar del promedio de los porcentajes de arribo por número de escenarios



Por lo antes expuesto se considera que se puede realizar una primera aproximación del cálculo de contaminación por basura marina con un número de 500 escenarios.

## 4.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez determinado el número óptimo de escenarios, se aplican los pasos antes descritos para realizar la simulación de transporte de basura marina para las cinco fuentes emisoras seleccionadas. Sin embargo, los resultados que se llegan a obtener por ficheros es preciso procesarlos y darles la interpretación adecuada a fin de obtener conclusiones claras y precisas sobre lo realizado. La herramienta elegida para ello es la aplicación de la estadística.

### 4.7.1. Probabilidad de contaminación

El cálculo de las probabilidades de contaminación, que se traduce en la probabilidad de arribo o no de basura marina desde la fuente emisora hacia la costa, se basa primeramente en la equiprobabilidad del método de Montecarlo, asumiéndose que los escenarios tomados aleatoriamente presentan igual probabilidad, por ende, la probabilidad de contaminación estará determinada por la llegada o no de la basura marina a la costa en determinado número de escenarios, siendo:

[Ec 1]

$$\text{Probabilidad de contaminación} = \frac{N \text{ escenarios basura marina en costa}}{\text{Total \# escenarios}} \times 100$$

Este resultado va a estar enfocado tanto para el análisis regional (costa del Pacífico Costa Rica), como para el análisis local ya que el tramo receptor 13 (Parque Nacional Corcovado) está implícito en la línea de costa a nivel de región.

### 4.7.2. Porcentaje de acumulación en la costa

Partiendo de la premisa de que en no todos los escenarios arriba el 100% de la basura emitida desde cada fuente emisora, es posible cuantificar el número de unidades de basura marina que llegan a cada tramo receptor, de manera que se puede determinar la acumulación recibida en los N escenarios simulados, por lo que ese porcentaje estará expresado por:

[Ec 2]

$$\text{Acumulación} = \frac{\sum \text{unidades basura de cada escenario por tramo}}{\text{Total unidades de basura liberada en cada escenario}} \times 100$$

Este término de acumulación de la basura en la costa estará enfocado a escala regional, que implícitamente arrojará el resultado también para la escala local (Parque Nacional Corcovado).

### 4.7.3. Aportación por fuente emisora

A partir de la obtención de la cantidad de basura expresada en porcentaje, se puede calcular desde qué fuente emisora se recibe el mayor porcentaje de basura marina, siendo:

[Ec 3]

$$\text{Aporte F.E} = \frac{\sum \text{unidades por fuente}}{\text{Total unidades}} \times 100$$

Este dato puede dar una percepción de qué porcentaje de basura marina aporta cada fuente emisora en función de la basura marina que ha arribado a costa. Este análisis también se realiza a escala regional y local.

#### 4.7.4. Probabilidad de acumulación en cantidad

Un producto clave que se puede obtener a partir de la información de las unidades de basura almacenadas en la costa por escenario es la distribución de la cantidad de las mismas, es decir, expresarlo en términos de función de probabilidad para determinar qué cantidad en términos de porcentaje de basura marina es más probable que reciba un tramo receptor, que para el presente trabajo, se va a enfocar en el Parque Nacional Corcovado. Una aplicación de este principio que se ha realizado en trabajos de investigación con partículas y modelos lagrangianos ha sido en el tema de los hidrocarburos, de lo cual, gráficamente la distribución de probabilidad se expresa con toneladas de vertido y se pretende asumir esta idea para la basura marina (Figura 23).

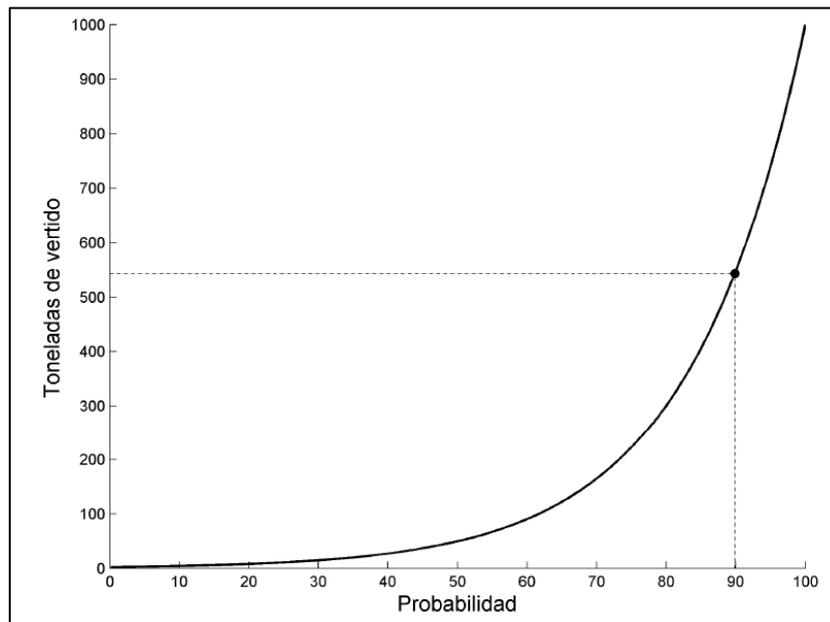


Figura 23: Representación de la función de distribución probabilística del vertido de un hidrocarburo. Fuente: (Abascal, 2009)

Matemáticamente la función de probabilidad, cuyo nombre adecuado a la aplicación que se va a realizar es la función de densidad acumulada, consiste en que una variable aleatoria “x” evaluada dentro de un dominio (en este caso el número de escenarios) tome valores menor o igual a la misma, por tanto:

[Ec 4]

$$F(x) = P(X \leq x)$$

$$P(X \leq x) = F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$

La resolución de esta función suele ser tipo numérico por lo que se acude al uso de programas y para el caso del presente, se utiliza excel, el cual precisa de la media y la desviación estándar para su cálculo.

#### 4.7.5. Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta es otro valor clave a considerar ya que se podría detectar desde qué fuente emisora se recibe más rápido la basura marina en el Parque Nacional Corcovado y con qué probabilidad, siendo nuevamente la determinación de la función de distribución la que arrojará este resultado, por tanto, se expresaría de la siguiente manera:

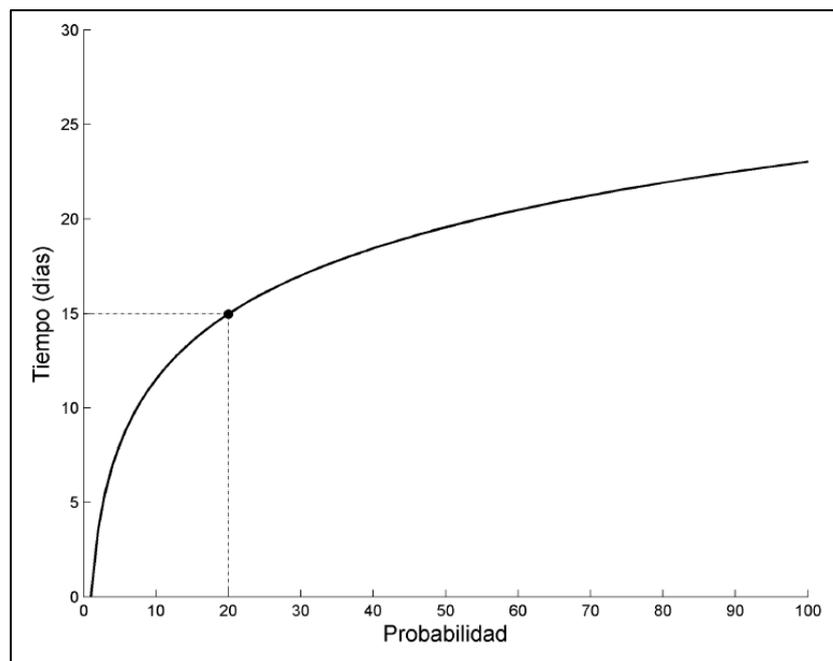


Figura 24: función de distribución del tiempo de respuesta. Fuente: (Abascal, 2009)

El principio del cálculo es el mismo que el del punto 4.9.4, además de que se utilizará la misma herramienta Excel para su obtención.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

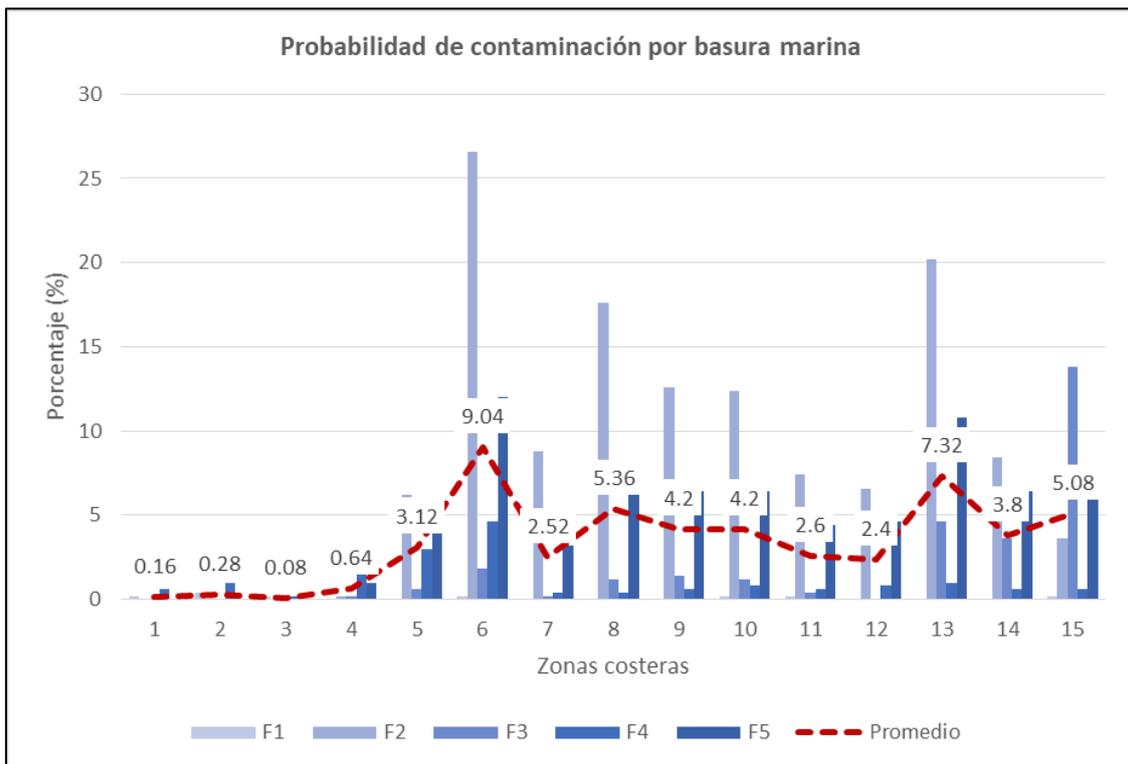
### 5.1. ANÁLISIS A ESCALA REGIONAL

El resultado obtenido a partir del tratamiento estadístico de los resultados derivados de la simulación de la basura marina en los 500 escenarios aleatorios a nivel del perfil costero de Costa Rica es la escala regional y la primera aproximación sobre el fenómeno de contaminación en términos probabilísticos que se produce en esta área. Se pretende con este análisis también determinar de dónde es más “probable” recibir la basura marina, es decir, qué fuente emisora de las propuestas aporta más en términos de porcentaje. A continuación se expone el desarrollo del análisis.

#### 5.1.1. Probabilidad de contaminación por zona

Tal como se detalló en el acápite 4.9.1. la probabilidad de contaminación que una determinada zona de la costa pueda llegar a tener estará expresada en término de porcentajes de los escenarios en que hubo contaminación (llegada de basura marina a costa) frente al total de escenarios simulados. Este resultado que es la razón principal del trabajo en curso, es analizada por cada segmento de la costa y por cada fuente emisora.

Gráfico No. 5: Probabilidad de contaminación por basura marina



Se puede distinguir que la zona con mayor probabilidad (Gráfico No. 5) de recibir basura marina, con la contaminación como efecto colateral, es la correspondiente a la zona 6 – Nicoya con un 26.6% seguida de la zona 13-Parque Nacional Corcovado con un 20.2%, además de las zonas 7, 8, 9 y 10, teniendo un comportamiento similar al registrado en el análisis de sensibilidad del modelo.



Si este resultado se expresa por su media, se ve de manera más clara qué zonas son en promedio más probable de contaminarse con basura marina, constatando lo antes mencionado. Es preciso indicar que debido al uso de fuentes emisoras representativas a escala regional, todos los segmentos de la costa registran probabilidad de contaminación. Al promediarse los valores, tanto la zona 6 como la zona 13 aparecen como las más probables de contaminarse por fuentes emisoras ubicadas en el tráfico marítimo en aguas abiertas.

Expresando esto de manera espacial (Figura 25), se detecta de mejor forma la distribución de la probabilidad en la costa, los mayores valores están ubicados en el área de Punta Arenas y en la Península de la Osa; además las zonas menos expuestas al mar abierto como la 1, 2 y 3 registran muy poca probabilidad de contaminación con las fuentes emisoras propuestas. Es preciso indicar que estas probabilidades de contaminación no ahondan en aspectos como la intensidad de tráfico que pueda existir en el área de cada fuente emisora, simplemente se considera el aspecto de llegada de la basura marina en costas.

A partir de la Figura 25 es posible detectar las áreas que son más susceptibles de ser contaminadas por basura marina según las fuentes emisoras propuestas, en lo cual, el aspecto espacial toma un papel importante en los mismos ya que esto va variando acorde a la ubicación de la fuente emisora y de la geografía de la costa, teniéndose los menores valores de probabilidad en accidentes como golfos (zona 7, zona 14).

Un dato no menos importante que se puede deducir de este análisis es que a pesar de que es hasta el 26.6% probable de que se produzca una contaminación de plástico debido a su arribo a costa, es hasta 73.4% probable de que la basura quede flotando en el océano o arribe a otras costas fuera del área de estudio.

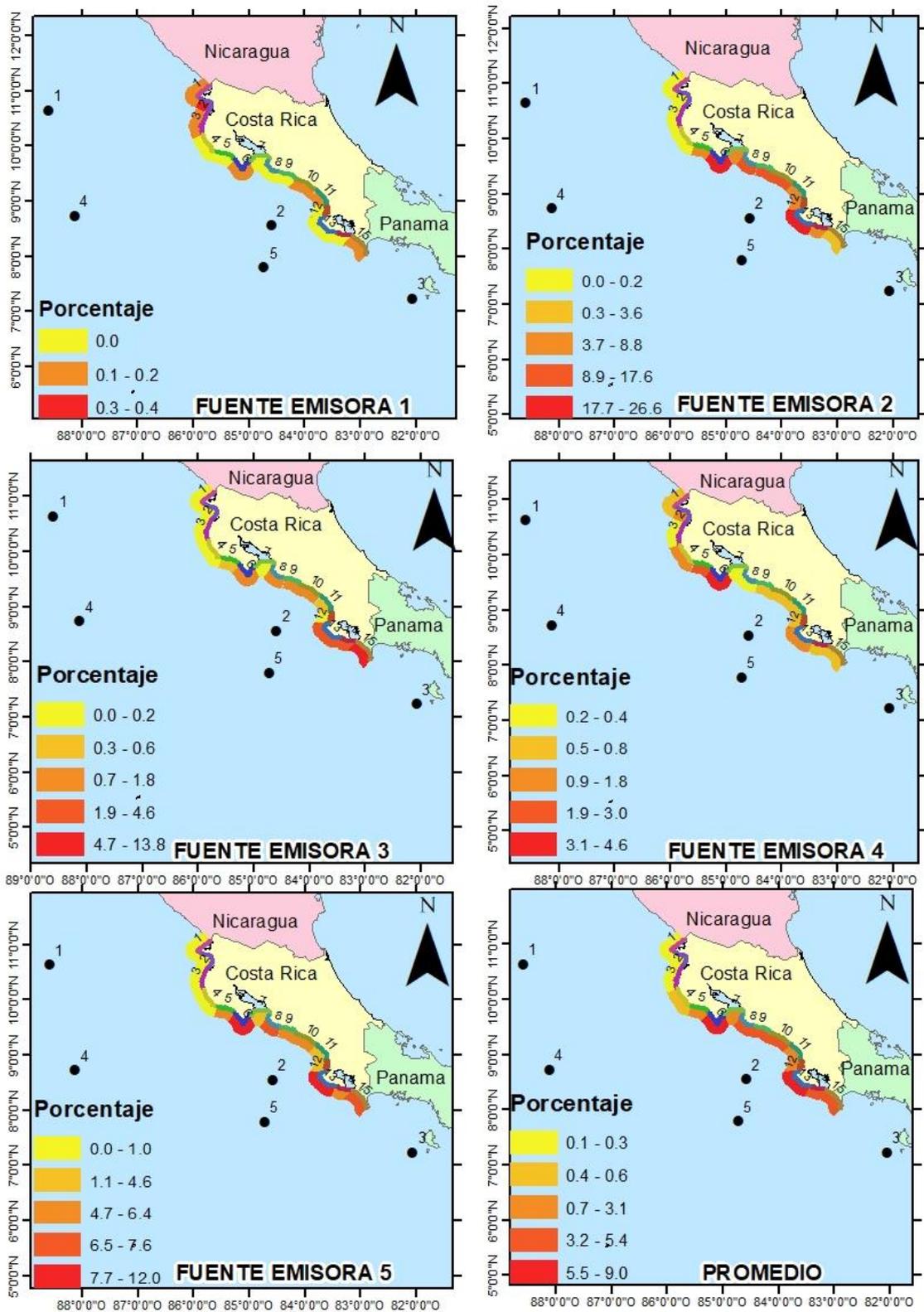


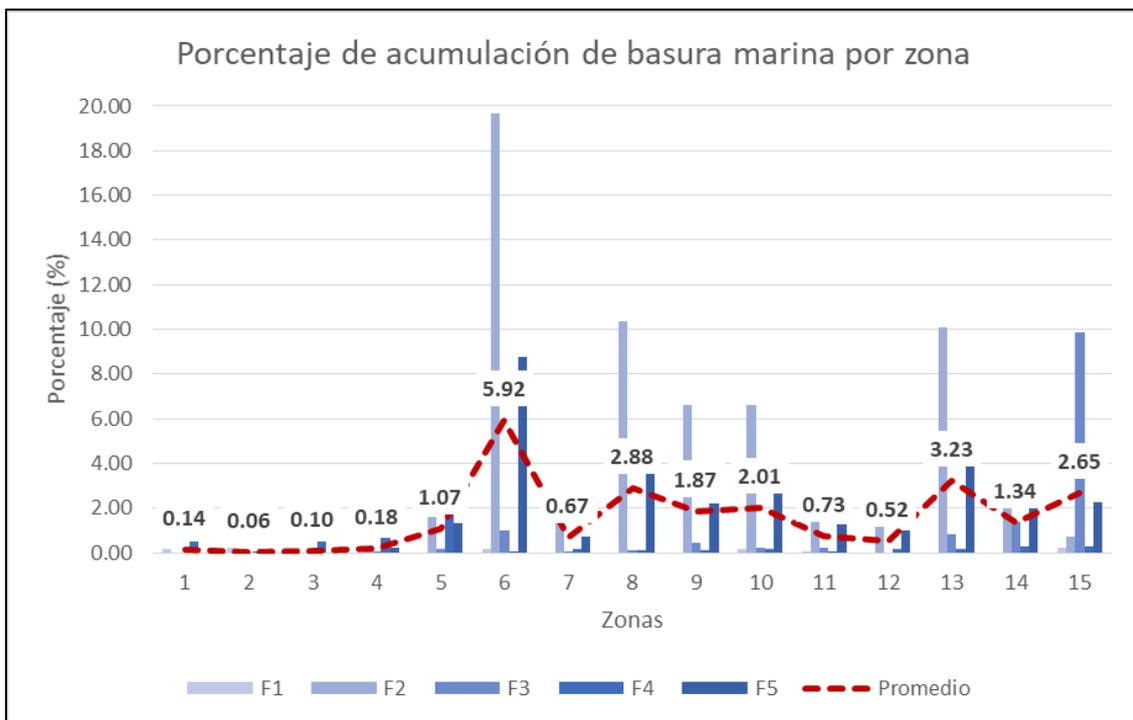
Figura 25: Probabilidad de contaminación por basura marina en la costa



### 5.1.2. Distribución espacial de acumulación de basura marina

Las zonas de acumulación hacen referencia a la cantidad de basura marina (representada por 1000 partículas en cada escenario) que se acumulan una vez arribados a costa, realizando un detalle a nivel de cada segmento que conforman al perfil costero. Con base en la ecuación 2 se determina el porcentaje de unidades de basura arribadas frente al total de liberadas desde las fuentes emisoras que registra cada zona (en el total de escenarios), y se obtiene el grado de acumulación por cada una según se detalla en el Gráfico No. 6. (En Anexo II se adjuntan los valores en tabla).

Gráfico No. 6: Porcentaje de acumulación de basura marina por zona



Como se puede apreciar en el Gráfico No. 6, las zonas que mayor acumulación de basura marina registran son las correspondientes a la zona 6, 13 y 15, es decir, en términos de cantidad que no es lo mismo que la probabilidad de contaminación ya que precisamente las más susceptibles de ser contaminadas no son precisamente las que más acumulación presentan como en el caso de las zonas 14 y 15. Las zonas centrales como la 8, 9 y 10 también registran porcentajes representativos de acumulación, al contrario de las iniciales, que apenas registran acumulación de basura marina.

Si se visualiza a nivel panorámico los datos el máximo porcentaje de acumulación que se registra es de aproximadamente del 20%, por lo que se puede inferir que en el transcurso de 30 días desde el descarte de basura marina en la superficie marina, un gran porcentaje (aproximadamente el 80%) no ha llegado a costa de la zona de estudio o ha derivado a mar abierto. Representando espacialmente estos resultados, es fácil distinguir la acumulación de basura marina que se produce en cada segmento de la costa según la fuente emisora, siendo la zona 6, el área de Punta Arenas que registra acumulación la mayoría de los casos (Figura 26).

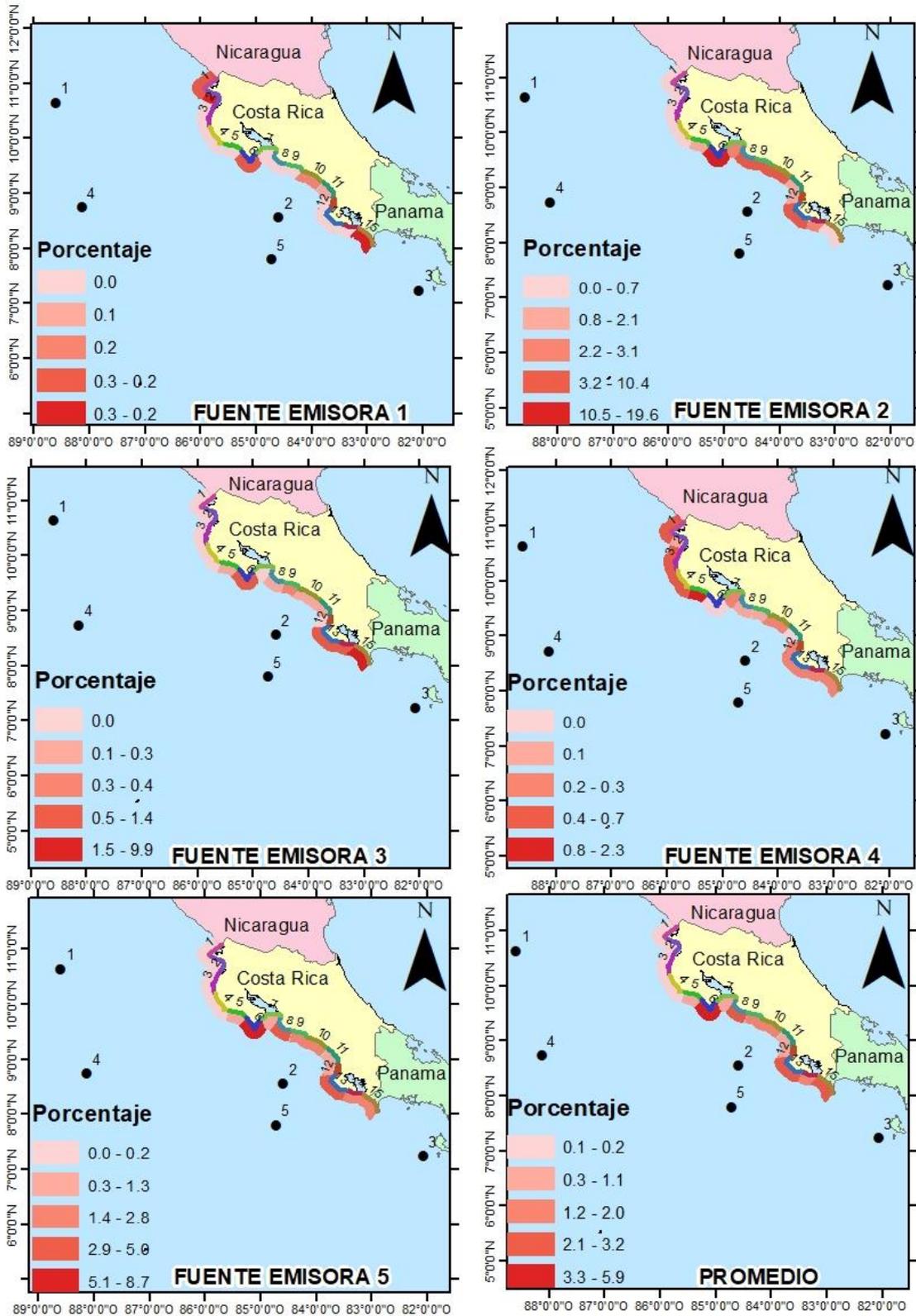


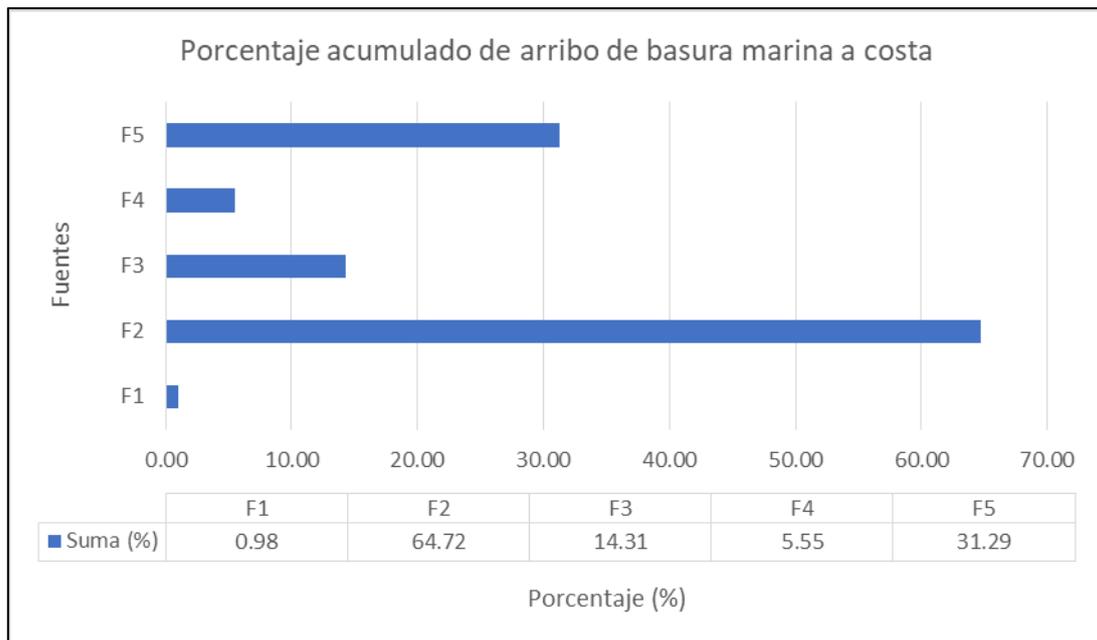
Figura 26: Representación espacial de las zonas de acumulación de basura marina



### 5.1.3. Aportación de basura marina por fuente emisora

Al tener identificadas las zonas que mayor acumulación de basura marina registraron, es preciso conocer cuáles son las fuentes que más aportan al arribo de ese contaminante hacia la costa. Observando los resultados del acápite anterior se puede percibir a groso modo qué fuentes son las más aportantes, sin embargo, es preciso representar los porcentajes acumulados en costa por cada fuente para tener un veredicto más preciso lo cual se calculó con la ecuación 3 del acápite 4.7.2.

Gráfico No. 7: Porcentaje de basura marina acumulada en costa según su fuente emisora



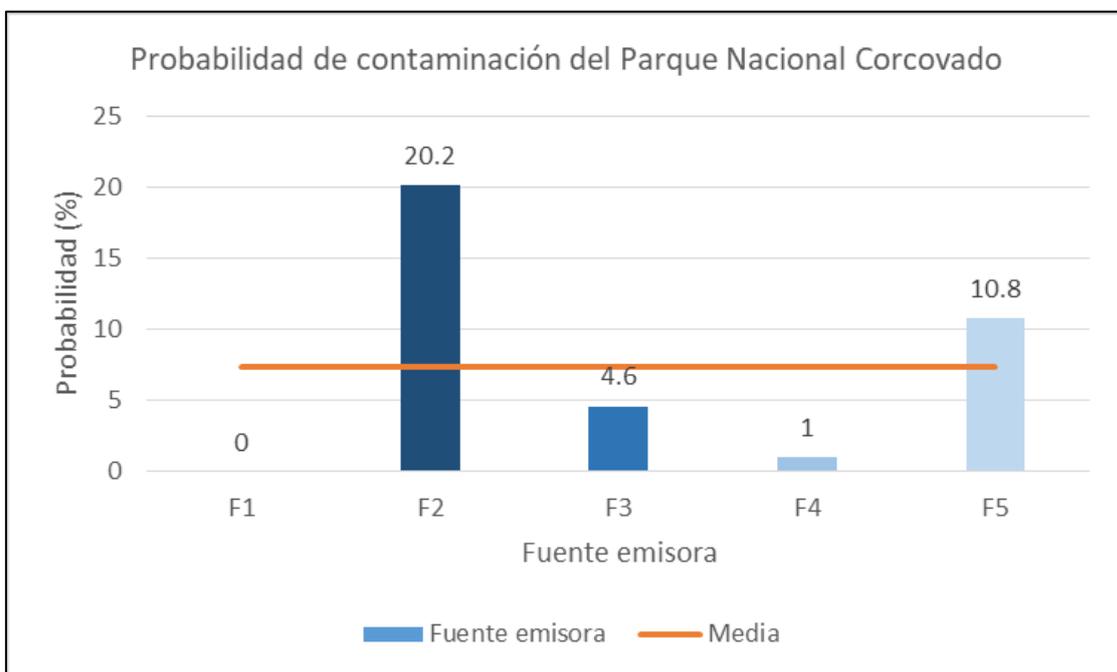
Según el Gráfico No. 7, las fuentes 2 y 5 son las que aportan más porcentaje de basura marina hacia el borde costero de Costa Rica, lo cual apoya la percepción lógica de que precisamente son aquellos puntos que se ubican frente al país, es decir, los más próximos. La fuente emisora 2 es la que lidera el porcentaje de aporte con un valor del 64.72%, seguido de la fuente emisora 5 con un 31.29%.

## 5.2. ANÁLISIS A ESCALA LOCAL: PARQUE NACIONAL CORCOVADO

### 5.2.1. Probabilidad de contaminación

Tal como se ha expresado en el punto 4.9.1. la probabilidad de contaminación está dada por el número de escenarios en que se registra la llegada de basura marina, en el presente caso al Parque Nacional Corcovado, sobre el total de escenarios simulados. Según los cálculos realizados, esta área de Costa Rica tiene el 7.32% de probabilidad de contaminación en promedio, que sería la probabilidad representativa del Parque Nacional Corcovado (Gráfico No. 8).

Gráfico No. 8: Probabilidad de contaminación del Parque Nacional Corcovado



Representando este valor en forma espacial respecto a las fuentes emisoras y conforme a la información presentada en el anterior gráfico, se ubica como una de las localizaciones más susceptibles de ser contaminadas después de Nicoya (zona 6) si la fuente de aportación se ubica en la ruta principal de tráfico marino (Fuente 2), si se localiza frente a sus costas (Fuente 2 y Fuente 5) o si la fuente emisora se ubica en la convergencia del tráfico marítimo hacia el canal de Panamá (Fuente 3) (Figura 27). La fuente emisora 1 presenta una probabilidad cero de contaminar a esta región conforme los resultados del presente documento.

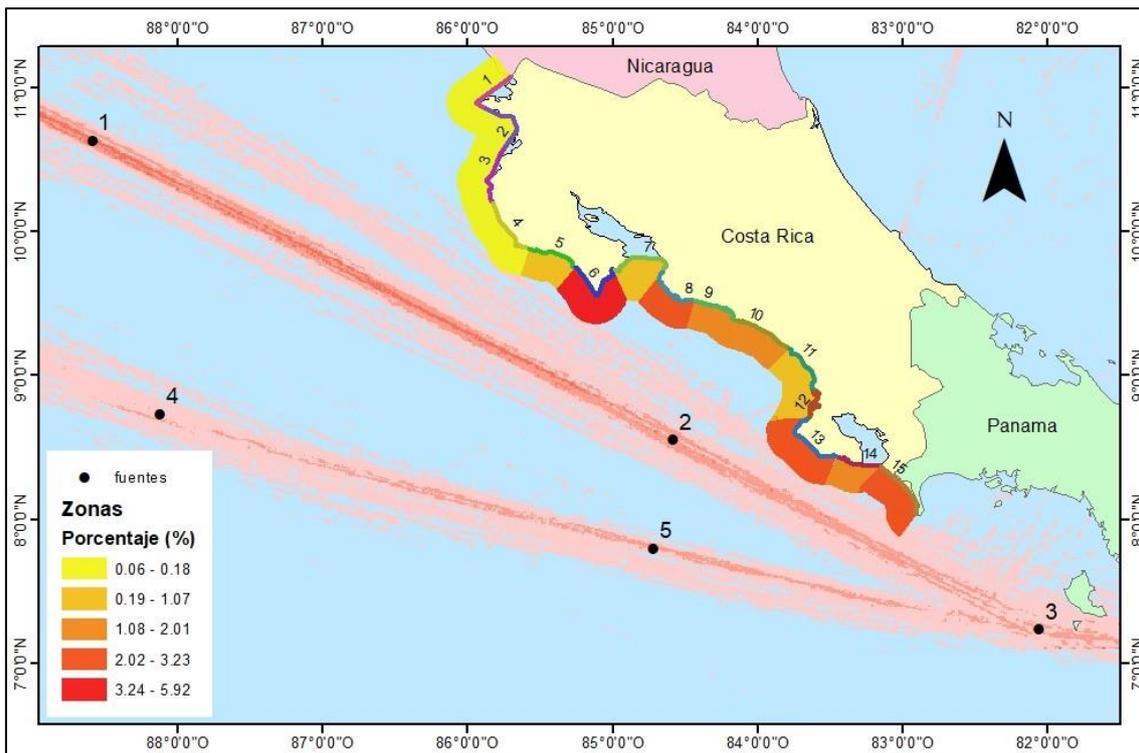


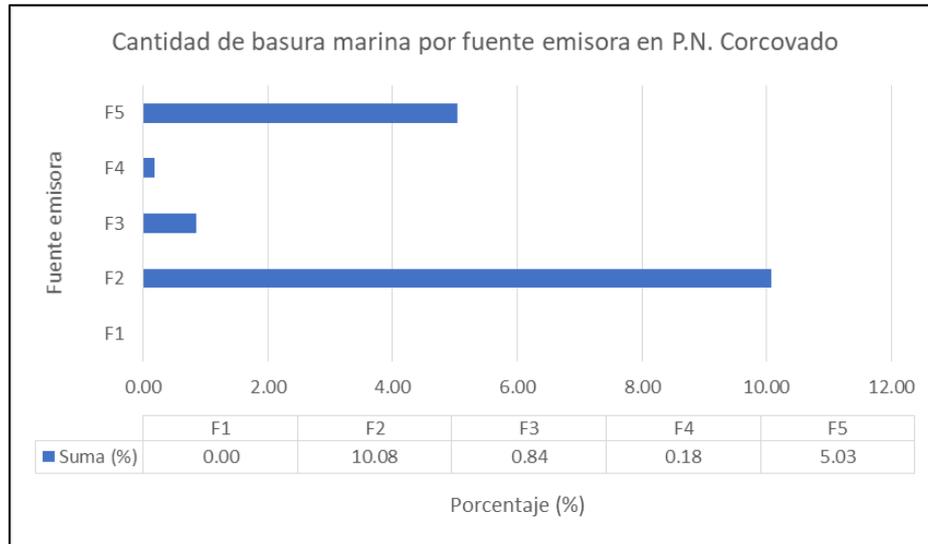
Figura 27: Representación espacial de la probabilidad de contaminación hacia el Parque Nacional Corcovado



### 5.2.2. Cantidad de basura marina por fuente emisora

En términos de cantidad expresada en porcentaje, las fuentes que efectivamente más aportan de basura marina en el parque Nacional Corcovado son las que provienen de las fuentes emisoras 2 y 5, siendo la segunda la que aporta hasta el 10% de la cantidad total de basura marina simulada (Gráfico No. 9).

Gráfico No. 9: Cantidad de basura marina aportada por fuente emisora en Parque Nacional Corcovado

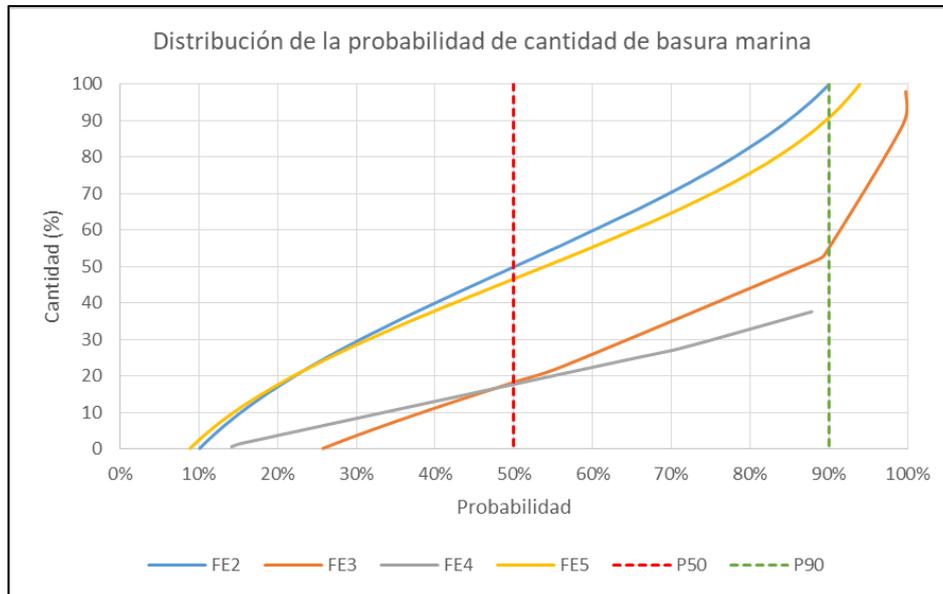


### 5.2.3. Probabilidad de acumulación en cantidad

Este análisis solo comprende los escenarios en que se registró llegada de basura marina a las costas por cada fuente emisora<sup>13</sup>. Con base en la ecuación (4), se procede a presentar la distribución de probabilidad (función de densidad) a la cantidad de basura en términos de porcentaje versus la probabilidad con el objetivo de comprender qué tan probable es que el 100% de la basura marina emanada de una fuente emisora llegue en su totalidad en la costa, especialmente en el Parque Nacional Corcovado.

<sup>13</sup> Nota aclaratoria: a modo de ejemplo, si para la fuente emisora 2 se identificó que de los 500 escenarios simulados, 100 registraron arribo de basura al perfil costero de Costa Rica, con los registros de número de partículas de estos 100 escenarios se realiza el cálculo del acápite 5.2.3.

Gráfico No. 10: Distribución probabilística de la cantidad de basura marina en el Parque Nacional corcovado



El Gráfico No. 10 representa la distribución de probabilidad de la basura marina acumulada por cada fuente emisora, de donde:

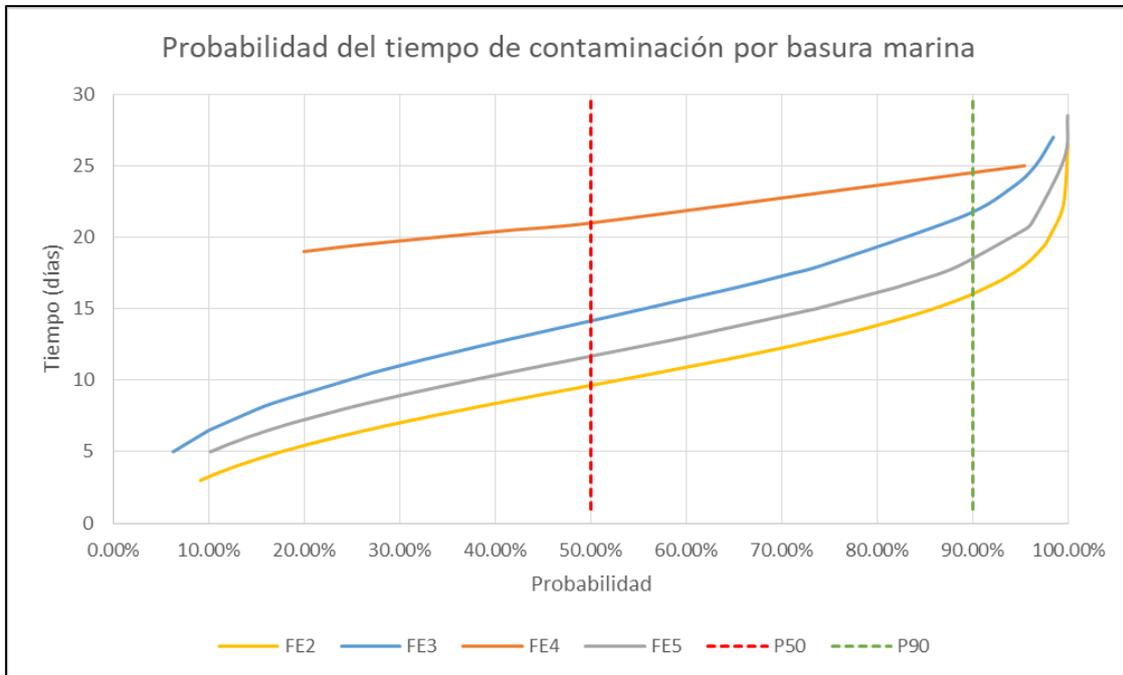
- De los escenarios en donde llegó basura marina al Parque Nacional Corcovado, es 90% probable que la mitad (50%) de la basura que se descartó de las fuentes emisoras 3 y 4 arribe a la costa.
- El 80% de la basura que se desecha de las fuentes emisoras 2 y 5 presenta el 90% de probabilidad de que se aloje en la costa en los escenarios en donde se registra arribo, convirtiéndose por tanto en las fuentes que son más probables de aportar con mayor cantidad de basura al Parque Nacional Corcovado.
- Así mismo es 50% probable que la mitad de la basura descartada desde las fuentes emisoras 2 y 5, y el 20% de la basura desechada desde las fuentes emisoras 3 y 4 se alojen en la costa del Parque Nacional Corcovado.

#### 5.2.4. Probabilidad del tiempo de llegada a costa

Datos tan importantes como la probabilidad de contaminación por basura marina desde fuentes emisoras en el tráfico marítimo, qué cantidad en términos de porcentaje de la basura descartada desde estas fuentes es probable que arribe a esta zona arrojan un panorama probabilístico importante de la contaminación por este elemento, pero no menos trascendente es determinar en qué tiempo es más probable recibir la basura marina en este segmento de costa, ya que un dato como este es crucial a la hora de plantearse acciones concretas frente a esta problemática.

Con la base de datos obtenida se procedió a cuantificar el número de horas que la basura marina arriba al Parque Nacional Corcovado por cada escenario en que se registró arribo de basura a la costa (ecuación 5) y se ha procedido a representar la distribución temporal en términos probabilísticos con la función de densidad (Gráfico No. 11).

Gráfico No. 11: Probabilidad del tiempo de arribo a la costa



Del Gráfico No. 11 se puede interpretar que:

- La basura que es liberada desde la fuente emisora 4 es la que más tiempo tardaría -20 días- en llegar a la costa del Parque Nacional Corcovado (90% de probabilidad) en los escenarios en que se registra arribo de basura a la costa.
- Para el resto de las fuentes, aproximadamente es 20% probable que la basura marina llegue a costa en 5 a 10 días, 50% probable en 10 a 15 días y 90% probable en 15 a 25 días.
- Entre las fuentes 2, 3 y 5, es 10% probable que la basura tarde en llegar de entre 5 a 10 días a la costa, 50% probable que arribe entre 10 a 15 días y 90% probable que tarde entre 15 a 25 días en arribar, en síntesis, desde las fuentes emisoras antes citadas la basura marina tarda menos tiempo en llegar que desde la fuente emisora 4.

### 5.3. DISCUSIÓN

A través de la ejecución del marco metodológico propuesto y de los resultados derivados del mismo, se puede identificar tanto a escala regional como a escala local la probabilidad de contaminación por basura marina en la costa desde el tráfico marítimo. A través del uso de una base de datos histórica de corrientes y vientos, el armado equiprobables de escenarios y su posterior simulación y tratamiento estadístico arrojan que las zonas de Nicoya (zona 6) y el Parque Nacional Corcovado (zona 13) son las más probables de contaminarse con basura marina, no obstante, en el caso del área protegida objeto de estudio, la probabilidad de contaminarse desde las rutas de tráfico marítimo apenas llega al 7% en conjunto y dependiendo de la fuente emisora alcanza hasta un 20%, esto solo contando de que en la literatura científica se hace mención que tan solo el 20% de la basura marina proviene de aguas abiertas (UNEP, 2009).

Es interesante percibir una relación existente entre la costa y la proximidad espacial de las fuentes emisoras, las cuales, dependiendo de su ubicación aportan en más o en menor cantidad de basura marina a determinados puntos de la costa de Costa Rica, además que las regiones costeras son susceptible de recibir un 10% del total del contaminante, que es la basura marina. No obstante, estas respuestas pueden ser comprendidas dentro de un período experimental de 30 días, que, si se descarta el porcentaje de basura acumulada a nivel regional dentro de este período, el restante es posible que continúe flotando en la superficie marina o que haya arribado a puntos costeros fuera del área de estudio.

Es imprescindible no olvidar a las simplificaciones que ha sido sometido el presente estudio, debiéndose tomar en consideración que los plásticos cubren un amplio espectro de densidad, lo cual en cierta manera lo condiciona el coeficiente de arrastre para su transporte (Yoon et al., 2010), teniéndose por tanto estos resultados como representativos de elementos flotantes, no obstante, el marco metodológico ha derivado a resultados que han podido interpretarse de manera aproximada al caso de estudio al menos en el ámbito probabilístico y que pueden ser útiles a la hora de tener la primera apreciación acerca de dónde proviene la basura marina que se acumula en el Parque Nacional Corcovado desde la perspectiva de aguas abiertas, no debiendo olvidar que los cauces fluviales tienen un peso muy importante en la aportación de la basura marina.

Es importante tampoco olvidar que para una mejor determinación probabilística lo más aconsejable es que cada fuente emisora posea un peso dentro de la probabilidad global ya que depende en gran medida de la intensidad de tráfico que exista en cada una y es lo que no se ha considerado en este trabajo de fin de máster debido a la compleja accesibilidad confiable de estos datos.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- **Metodológicos**
  - Conforme a la metodología propuesta que se nutre de bases de datos históricos mundiales en velocidad de corrientes y velocidad de vientos de libre acceso, además de datos espaciales y el modelo numérico de transporte TESEO, además de la simulación de Montecarlo se pudo calcular la probabilidad de contaminación por basuras marinas tanto a escala regional como a escala local, por lo que la propuesta ha permitido determinar el objetivo planteado.
  - La escala espacial de trabajo comprendió toda la línea de costa de Costa Rica a nivel regional correspondiente a una escala temporal de 30 días.
  - El modelo numérico de transporte no mostró mayor sensibilidad a la variación del número de partículas, siendo un aspecto más decisivo el tiempo computacional empleado; en cuanto a la malla de cálculo, en resoluciones más finas es posible tener una evaluación más acertada respecto si la partícula se encuentra aún sobre la superficie marina o en costa.
  - El uso del método o simulación de Montecarlo fue efectivo a la hora de conformar escenarios estadísticamente representativos del conjunto de datos meteoceánicos históricos, llegando a presentar una estabilidad desde los 500 escenarios.
- **Problemática**
  - Las zonas más susceptibles de contaminación por basura marina en Costa Rica son las regiones de Nicoya y la península de la Osa, en donde se ubica el Parque Nacional Corcovado, ya que son quienes registran la mayor probabilidad de que se produzca un arribo de basura marina en sus costas.
  - Cerca del 64% de la basura marina que se recibe a escala regional en Costa Rica proviene de la fuente emisora 2, ubicada en las proximidades del país, sin embargo esta misma aporta con el 10% a la zona del Parque Nacional Corcovado. La fuente emisora 5 que se localiza en la convergencia de las rutas marítimas que se dirigen hacia el canal de Panamá también es un importante aportante de basura marina a las costas y al área del Parque Nacional Corcovado, presentando hasta un 31% de la cantidad acumulada de basura a escala regional y un 5% a nivel local.
  - Según el análisis realizado, el 80% de la basura liberada desde las fuentes emisoras propuestas no llegan a la costa de la zona de estudio o quedan derivadas en mar abierto.
  - De los escenarios en que la basura marina llega a la costa, la mayoría (80%) de lo que se vierte desde las fuentes emisoras 2 y 5 es más probable (90%) que se deposite en la costa, mientras que sólo la mitad de lo que se descarte en las fuentes 3 y 4 alcanzan esta probabilidad, contribuyendo con menos basura.
  - La basura marina que es vertida desde las fuentes emisoras 2, 3 y 5 arriban más rápido a la costa del Parque Nacional Corcovado que la basura marina descartada desde la fuente emisora 4.



## 6.2. RECOMENDACIONES

- Ejecutar la metodología propuesta para diferentes tipologías de plásticos, teniendo en cuenta el efecto relativo del viento y las corrientes en función del tipo de basura.
- Utilizar datos met-ocean de mayor resolución espacial con el fin de refinar el modelado en la zona costera.
- Ampliar el número de fuentes emisoras y realizar una evaluación tipo “backtracking” a fin de tener un detalle más amplio sobre dónde proviene la basura marina (en el aspecto marítimo) que se deposita en el Parque Nacional Corcovado.
- Aumentar la escala temporal de estudio a fin de determinar si dadas unas fuentes emisoras, la basura marina permanece en estado de “flotabilidad” o si resulta probable que aún lleguen a la costa como un proceso de contaminación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abascal, A. J., Castanedo, S., Gutierrez, A. D., Comerma, E., Medina, R., & Losada, I. J. (2007). Teseo, an operational system for simulating oil spills trajectories and fate processes. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, (January), 1751-1758.
- Abascal, A.J., Castanedo, S., Medina, R., Losada, I.J., Alvarez-Fanjul, E., 2009a. Application of HF radar currents to oil spill modelling. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.09.020>
- Abascal, A.J., Castanedo, S., Mendez, F.J., Medina, R., Losada, I.J., 2009b. Calibration of a Lagrangian Transport Model Using Drifting Buoys Deployed during the Prestige Oil Spill. *J. Coast. Res.* 251, 80–90. <https://doi.org/10.2112/07-0849.1>
- Abascal, A. J., Castanedo, S., Medina, R., & Liste, M. (2010). Analysis of the reliability of a statistical oil spill response model. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2099-2110. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.008>
- Abascal, A. J. (2009). *Avances en el modelado de transporte de hidrocarburos. Aplicación en la respuesta a vertidos marinos accidentales.* 1. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=181656>
- ASCE. (1996). State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(11), 594-609. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:11\(594\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:11(594))
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Bergmann, M., Gutow, L. and, & Klages, M. (2015). *Marine Anthropogenic Litter.* <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>
- Bixby, L., Maldonado, T., & Bonilla, R. (2002). Bosque y población en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 50(2), 585-598. Recuperado de [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442002000200018&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442002000200018&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Boerger, C. M., Lattin, G. L., Moore, S. L., & Moore, C. J. (2010). Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, 60(12), 2275-2278. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.08.007>
- Brandini, C., Taddei, S., Fattorini, M., Lapucci, C., Fossi, M. C., Baini, M., ... Galgani, F. (2018). Numerical models for Marine Litter distribution in the North-Western Mediterranean Sea, towards a seasonal characterization of concentration. En *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 20). Recuperado de <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-17078-1.pdf>
- Carlson, D. F., Suaria, G., Aliani, S., Fredj, E., Fortibuoni, T., Griffa, A., ... Melli, V. (2017). Combining Litter Observations with a Regional Ocean Model to Identify Sources and Sinks of Floating Debris in a Semi-enclosed Basin: The Adriatic Sea. *Frontiers in Marine Science*,



4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00078>

- CONAMA. (2016). *GT-16 Basuras marinas: DOCUMENTO FINAL DEL GRUPO DE TRABAJO*. 157. Recuperado de [http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/GTs2016/16\\_final.pdf](http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/GTs2016/16_final.pdf)
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Ubeda, B., Hernández-León, S., ... Duarte, C. M. (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(28), 10239-10244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314705111>
- Critchell, K., Grech, A., Schlaefel, J., Andutta, F. P., Lambrechts, J., Wolanski, E., & Hamann, M. (2015). Modelling the fate of marine debris along a complex shoreline: Lessons from the Great Barrier Reef. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167, 414-426. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.10.018>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., ... 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), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Galgani, F., Hanke, G., & Maes, T. (2015). Global Distribution, Composition and Abundance of Marine Litter. En *Marine Anthropogenic Litter* (pp. 29-56). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_2)
- García-Barroso, G. (2018). *Mejora de la gestión de Residuos Sólidos Urbanos en el cantón de Osa y caracterización de residuos plásticos en la playa del Parque Nacional Corcovado (Costa Rica)*. Universidad Politécnica de Madrid.
- GESAMP. (2016). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment. En *IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/ UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection* (Vol. 93).
- González, R. (2019). *La playa que llora basura | Teletica*. Recuperado de [https://teletica.com/225011\\_la-playa-que-llora-basura](https://teletica.com/225011_la-playa-que-llora-basura)
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., ... Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948-952. <https://doi.org/10.1126/science.1149345>
- IH Cantabria. (s. f.). TESEO: Modelo de Simulación de Transporte de Hidrocarburos. Recuperado 2 de octubre de 2019, de <https://www.ihcantabria.com/es/software/item/35-teseo>
- Instituto Costarricense de Turismo. (2017). *PLAN NACIONAL DE DESARROLLO TURÍSTICO DE COSTA RICA*. Recuperado de <https://www.ict.go.cr/en/documents/plan-nacional-y-plan-general/plan-nacional-de-desarrollo/1071-plan-nacional-de-desarrollo-turistico-2017-2021/file.html>
- Instituto de Hidráulica Ambiental Universidad de Cantabria. (2016). *Manual del Usuario TESEO 1.2*. Recuperado de [https://www.ihcantabria.com/images/Fotos\\_Noticias/teseo/Manual\\_TESEO.pdf](https://www.ihcantabria.com/images/Fotos_Noticias/teseo/Manual_TESEO.pdf)



- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1260352>
- Kühn, S., Bravo Rebolledo, E. L., & van Franeker, J. A. (2015). Deleterious Effects of Litter on Marine Life. En *Marine Anthropogenic Litter* (pp. 75-116). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_4)
- Laist, D. W. (1997). *Impacts of Marine Debris: Entanglement of Marine Life in Marine Debris Including a Comprehensive List of Species with Entanglement and Ingestion Records*. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8486-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8486-1_10)
- Lebreton, L. C. M., Greer, S. D., & Borrero, J. C. (2012). Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Marine Pollution Bulletin*, 64(3), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.10.027>
- Liubartseva, S., Coppini, G., Lecci, R., & Creti, S. (2016). Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1-2), 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.031>
- Macfadyen, G., Huntington, T., & Cappell, R. (2011). Aparejos de pesca abandonados, perdidos o descartados. En *Informes y Estudios del Programa de Mares Regionales*.
- MINAE, CONAGEBIO, & SINAC. (2016). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2016-2025*. Recuperado de [https://www.conagebio.go.cr/Conagebio/public/documentos/EstrategiaNacionalBiodiversidad\\_0217.pdf](https://www.conagebio.go.cr/Conagebio/public/documentos/EstrategiaNacionalBiodiversidad_0217.pdf)
- Molnar, J. L., Gamboa, R. L., Revenga, C., & Spalding, M. D. (2008). Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(9), 485-492. <https://doi.org/10.1890/070064>
- Mouat, J., López, R., & Bateson, H. (2010). Economy Impacts of Marine Litter. En *Kommunernes Internationale Miljøorganisation*.
- NOAA. (2017). *Marine Debris as a Potential Pathway for Invasive Species*. 31. Recuperado de <https://marinedebris.noaa.gov>
- Peña, D. (2001). Fundamentos de estadísticas. En *Physical Review B* (1.ª ed., Vol. 72). Madrid: Alianza Editorial.
- Pereiro, D., Souto, C., & Gago, J. (2018). Calibration of a marine floating litter transport model. *Journal of Operational Oceanography*, 11(2), 125-133. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1470892>
- Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., ... Teh, S. J. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*, 5(September). <https://doi.org/10.1038/srep14340>
- Rojas, A., López, J., Morales, M. J., & Durán, R. (2015). *Propuesta estratégica de mercadeo para la empresa de turismo rural "El encanto de la piedra blanca"*. Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2770/1/38234.pdf>



- Rummel, C. D., Löder, M. G. J., Fricke, N. F., Lang, T., Griebeler, E. M., Janke, M., & Gerdts, G. (2016). Plastic ingestion by pelagic and demersal fish from the North Sea and Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.043>
- Ryan, P. G. (2015). A Brief History of Marine Litter Research. En *Marine Anthropogenic Litter* (pp. 1-25). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_1)
- Schwabl, P., Liebmann, B., Köppel, S., & Reiberger, T. (2018). Assessment of microplastic concentrations in human stool. *United European Gastroenterology UEG week*, 16. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16638.02884>
- SINAC. (2014). *Proyecto Fortalecimiento del Programa de Turismo en Áreas Silvestres Protegidas*. Recuperado de [http://www.sinac.go.cr/ES/transprncia/Planificacin y Gestin BID/Gestión Sostenible del Turismo en ASP/Planes de Turismo 10 ASP/Plan de Turismo Sostenible del PN Corcovado.pdf](http://www.sinac.go.cr/ES/transprncia/Planificacin%20y%20Gestin%20BID/Gesti%C3%B3n%20Sostenible%20del%20Turismo%20en%20ASP/Planes%20de%20Turismo%2010%20ASP/Plan%20de%20Turismo%20Sostenible%20del%20PN%20Corcovado.pdf)
- Treneman, N. C., Carlton, D. A., Chapman, J. W., Ruiz, G. M., Carlton, J. T., Steves, B. P., ... Miller, J. A. (2017). Tsunami-driven rafting: Transoceanic species dispersal and implications for marine biogeography. *Science*, 357(6358), 1402-1406. <https://doi.org/10.1126/science.aao1498>
- UN Environment. (2019). Global partnership on marine litter | UN Environment. Recuperado 3 de julio de 2019, de <https://www.unenvironment.org/explore-topics/oceans-seas/what-we-do/working-regional-seas/marine-litter>
- UNEP. (2009). Marine Litter: A Global Challenge. En *UNEP*. Recuperado de [www.unep.org/regionalseas](http://www.unep.org/regionalseas)
- UNEP. (2014). *Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry*. Recuperado de [www.unep.org/pdf/ValuingPlastic/](http://www.unep.org/pdf/ValuingPlastic/)
- UNEP. (2017). *MARINE LITTER SOCIO-ECONOMIC STUDY*. Recuperado de [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26014/Marinelitter\\_socioeco\\_study.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26014/Marinelitter_socioeco_study.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- UNEP, & GRID Arendal. (2016). Marine Litter Vital Graphics. En *United Nations Environment Programme and GRID-Arendal. Nairobi and Arendal*. Recuperado de [www.unep.org/5Cnwww.grida.no](http://www.unep.org/5Cnwww.grida.no)
- Van Sebille, E, Chris, W., Laurent, L., Nikolai, M., Britta Denise, H., Jan, A. van F., ... Kara Lavender, L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124006. Recuperado de <http://stacks.iop.org/1748-9326/10/i=12/a=124006>
- Van Sebille, Erik, Griffies, S. M., Abernathey, R., Adams, T. P., Berloff, P., Biastoch, A., ... Zika, J. D. (2018). Lagrangian ocean analysis: Fundamentals and practices. *Ocean Modelling*, 121(January), 49-75. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.11.008>
- Vaughan, C. (1981). *Parque Nacional Corcovado: Plan de manejo y desarrollo*. Recuperado de <http://repositorios.cihac.fcs.ucr.ac.cr/cmelenendez/handle/123456789/667>



Yoon, J. H., Kawano, S., & Igawa, S. (2010). Modeling of marine litter drift and beaching in the Japan Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 60(3), 448-463.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.09.033>



## ANEXOS

### ANEXO I: DETALLE DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

De acuerdo a la manipulación de la base de datos de la trayectoria de la basura marina por cada escenario desde una fuente emisora dada se ejecuta la obtención de probabilidades por cada grupo de escenarios, obteniendo la Tabla 3 como primer resultado para evaluar la representatividad estadística del conjunto de datos.

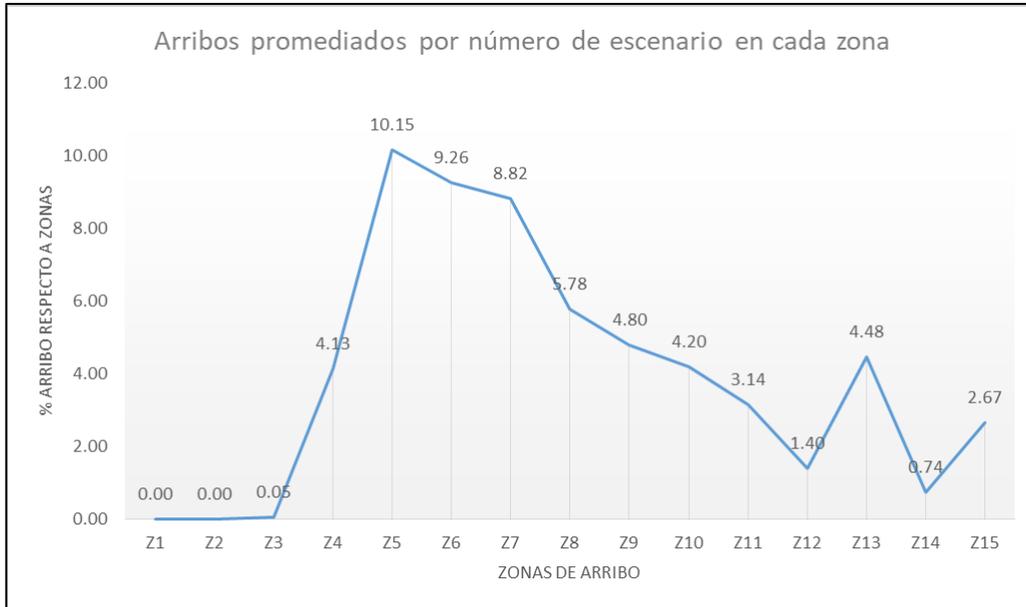
Tabla 3: Datos de probabilidad respecto al número de escenarios simulados

Número escenarios	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Promedio por escenarios	Mediana	Desviación estándar
10	0.00	0.00	0.00	10.00	20.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.67	0.00	5.94
25	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	16.00	12.00	8.00	0.00	8.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.27	0.00	6.13
50	0.00	0.00	0.00	4.00	4.00	6.00	10.00	8.00	10.00	6.00	2.00	0.00	8.00	0.00	4.00	4.13	4.00	3.74
75	0.00	0.00	0.00	2.67	6.67	1.33	8.00	2.67	4.00	1.33	1.33	1.33	2.67	0.00	1.33	2.22	1.33	2.40
100	0.00	0.00	0.00	4.00	8.00	11.00	10.00	6.00	6.00	8.00	5.00	1.00	3.00	0.00	1.00	4.20	4.00	3.86
200	0.00	0.00	0.00	4.50	9.50	11.00	10.50	4.50	6.00	4.00	5.50	5.00	7.50	2.00	3.50	4.90	4.50	3.60
300	0.00	0.00	0.33	4.33	8.00	9.67	11.33	10.33	7.00	2.67	2.33	0.67	4.00	1.00	4.67	4.42	4.00	3.96
500	0.00	0.00	0.00	4.20	10.20	9.80	7.80	5.20	4.20	2.80	4.40	2.60	6.40	1.40	4.20	4.21	4.20	3.29
700	0.00	0.00	0.14	3.43	9.00	8.57	9.71	7.29	6.00	5.00	3.71	2.00	8.71	2.29	5.29	4.74	5.00	3.42
Promedio por zonas	0.00	0.00	0.05	4.13	10.15	9.26	8.82	5.78	4.80	4.20	3.14	1.40	4.48	0.74	2.67			
Mediana zonas	0.00	0.00	0.00	4.00	9.00	9.80	10.00	6.00	6.00	4.00	3.71	1.00	4.00	0.00	3.50			
Desviación estándar por zona	0.00	0.00	0.11	2.46	4.62	3.75	3.37	2.94	3.04	2.65	1.72	1.54	3.14	0.90	1.96			

En el Gráfico No. 12 se representa de manera agrupada la variación espacial de la probabilidad, obteniendo una visión clara sobre qué zonas son más probables de contaminarse con basura marina, liderando el valor las zonas centrales de la costa y la península de la Osa que es la que corresponde a la zona 13: Parque Nacional Corcovado.

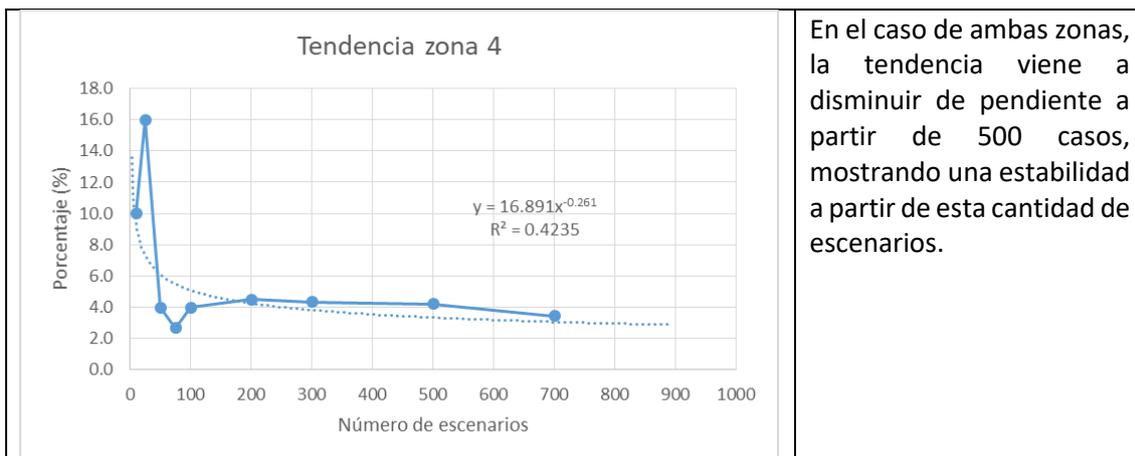


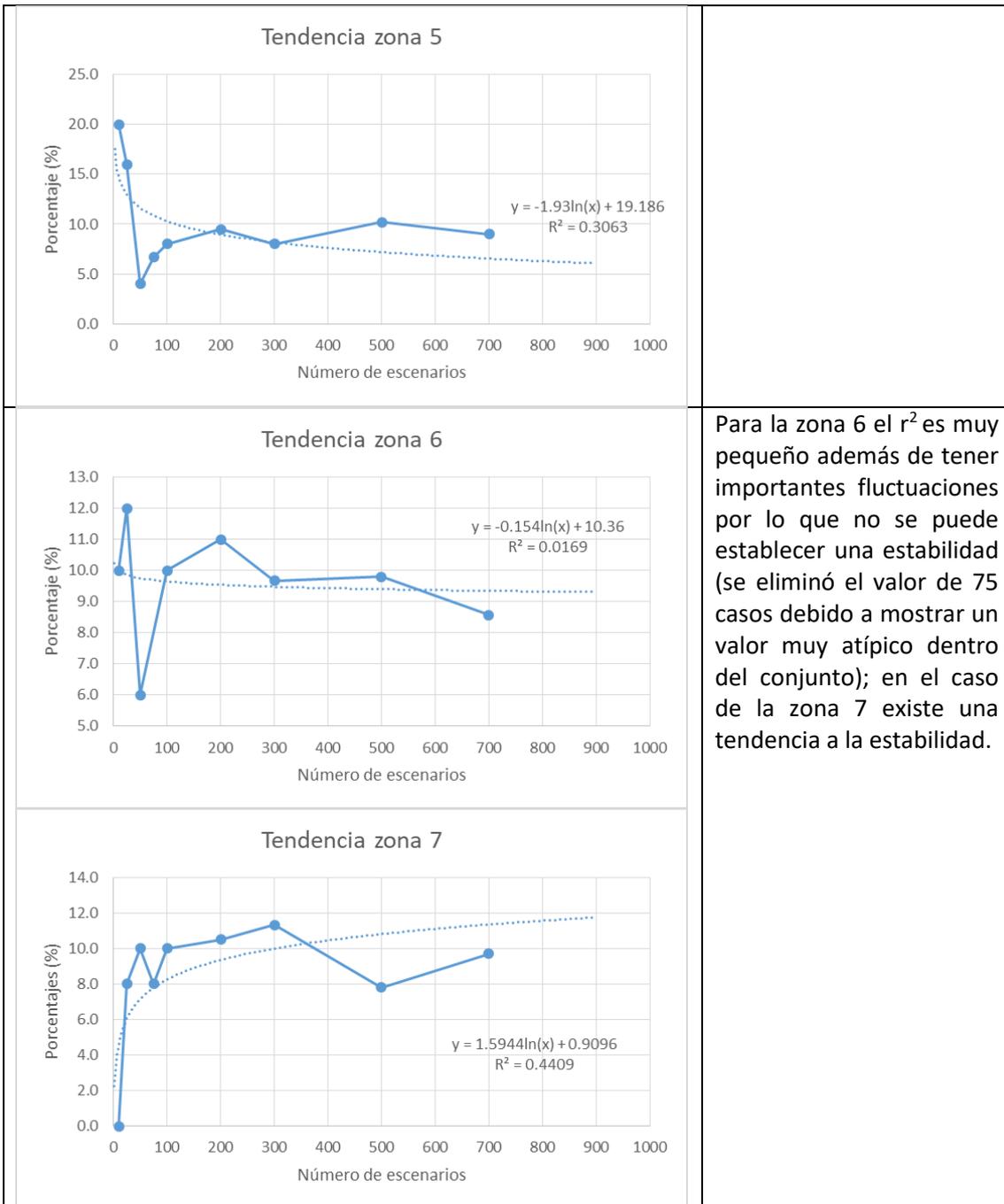
Gráfico No. 12: Representación promediada de arribos de partículas a cada zona



Si los datos se representan por cada zona, cada una presenta una distribución distinta entre sí, sin embargo, las que mostraron inicialmente menor desviación estándar son aquellas que también tienen mayor tendencia a la estabilidad (se excluye z1, z2 y z3 por tener 0% de probabilidad de arribo), por tanto analizándolas en pares (Tabla 4), se obtiene:

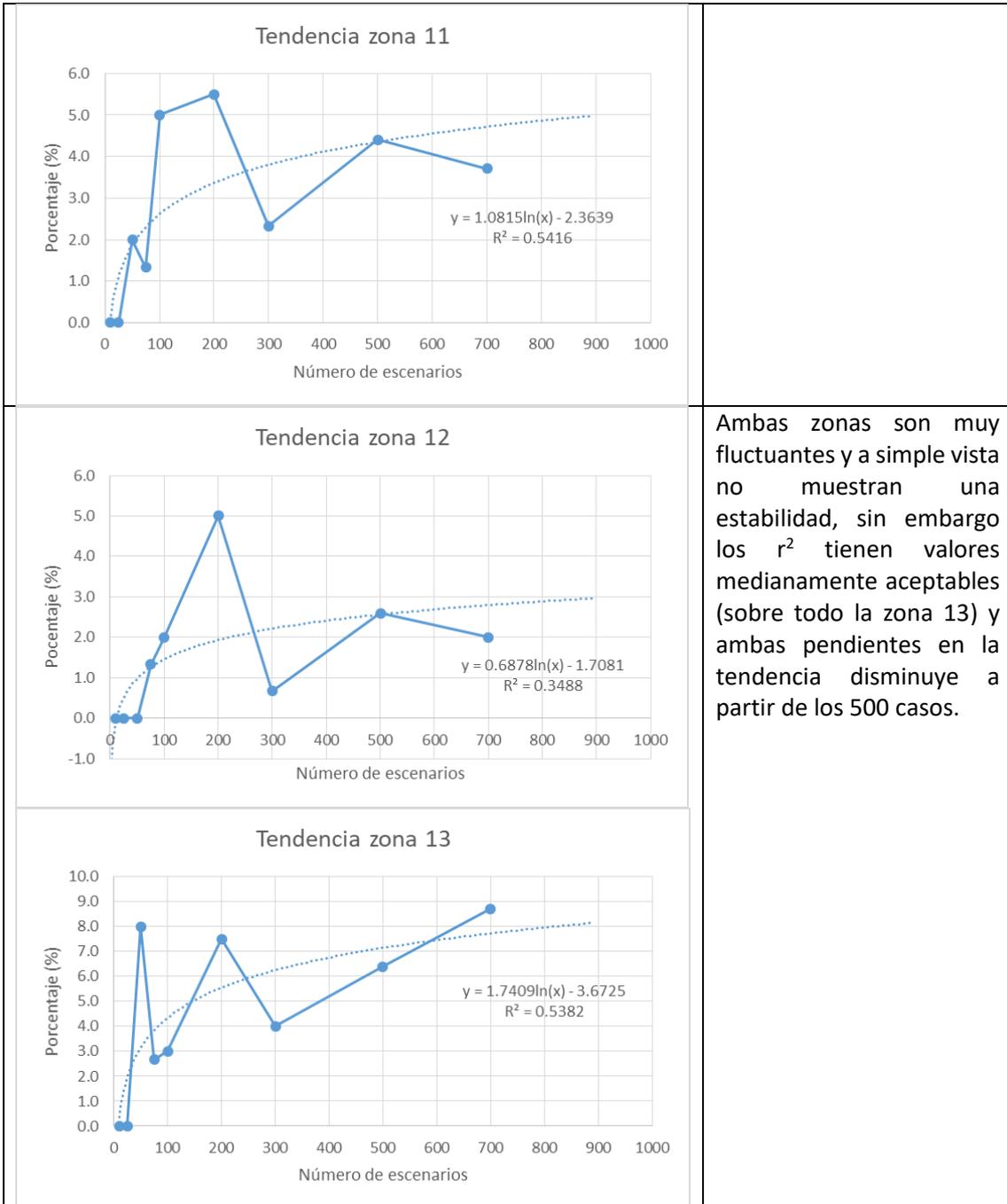
Tabla 4: Análisis de tendencias de cada zona por número de escenarios

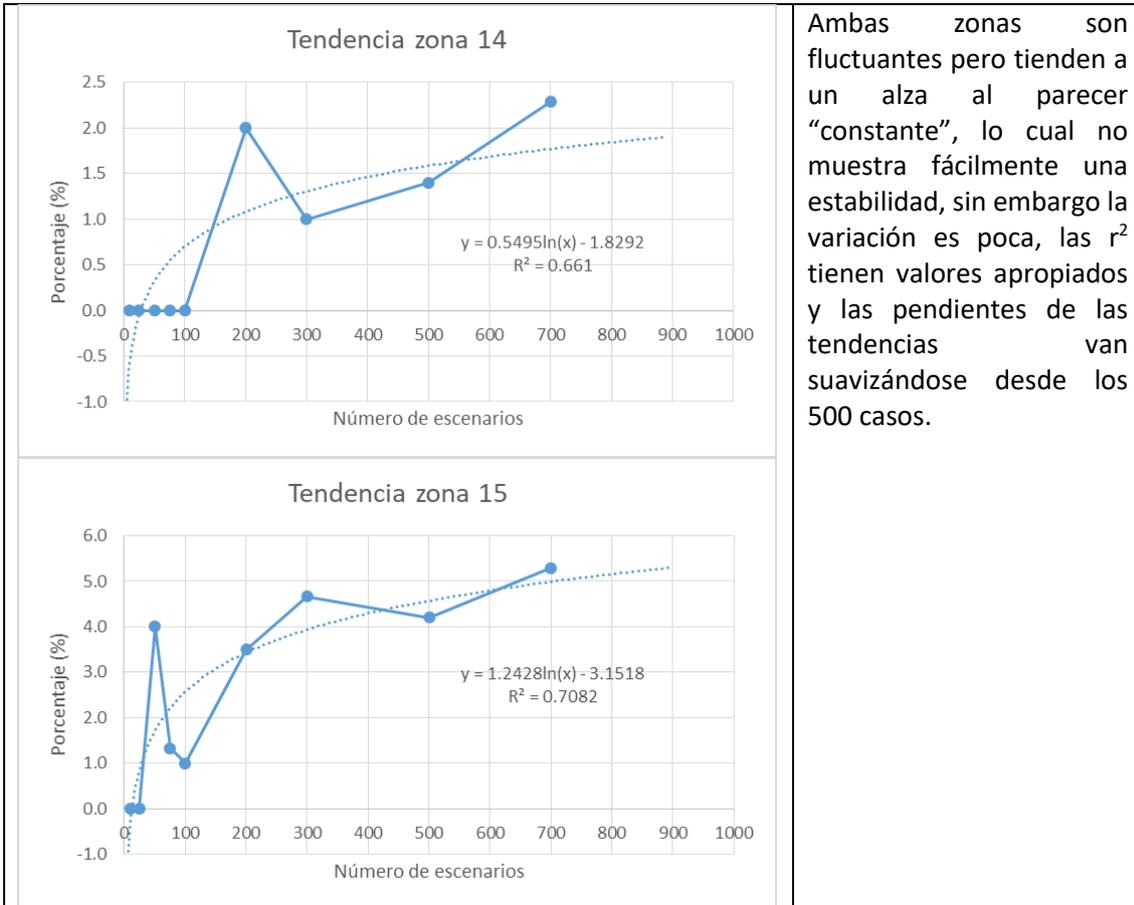






<p style="text-align: center;"><b>Tendencia zona 8</b></p> <p style="text-align: center;">Número de escenarios</p>	<p>A pesar de las fluctuaciones en ambas zonas, la tendencia es la disminución de esa variabilidad a partir de 500 casos, aunque en la zona 9 sea más difícil establecer una estabilidad debido al pequeño <math>r^2</math>.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Tendencia zona 9</b></p> <p style="text-align: center;">Número de escenarios</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Tendencia zona 10</b></p> <p style="text-align: center;">Número de escenarios</p>	
<p>En ambos casos no se puede precisar una estabilidad debido a las fluctuaciones que aún existen (sobre todo en la zona 10), a pesar de que la zona 11 va disminuyendo el valor de sus fluctuaciones.</p>	





## ANEXO II: TABLAS DE RESULTADOS

CANTIDAD DE BASURA MARINA POR ZONA EN TOTAL DE ESCENARIOS					
Zona	Fuentes emisoras				
	1	2	3	4	5
1	919	0	0	2477	0
2	1047	0	0	335	0
3	1	0	0	2521	0
4	0	1	6	3367	1136
5	0	8072	783	11397	6575
6	957	98265	4981	101	43667
7	0	12176	66	924	3481
8	0	51870	682	509	18932
9	0	33108	2143	633	10948
10	753	33137	1246	958	14080
11	247	10481	1224	154	6258
12	0	7295	0	917	4836
13	0	50392	4204	902	25167
14	0	15300	6957	1255	10044
15	1000	3494	49263	1290	11319

PORCENTAJE DE BASURA MARINA POR ZONA EN TOTAL DE ESCENARIOS						
Zonas	Fuentes emisoras					Promedio
	F1	F2	F3	F4	F5	
1	0.18	0.00	0.00	0.50	0.00	0.14
2	0.21	0.00	0.00	0.07	0.00	0.06
3	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.10
4	0.00	0.00	0.00	0.67	0.23	0.18
5	0.00	1.61	0.16	2.28	1.32	1.07
6	0.19	19.65	1.00	0.02	8.73	5.92
7	0.00	2.44	0.01	0.18	0.70	0.67
8	0.00	10.37	0.14	0.10	3.79	2.88
9	0.00	6.62	0.43	0.13	2.19	1.87
10	0.15	6.63	0.25	0.19	2.82	2.01
11	0.05	2.10	0.24	0.03	1.25	0.73
12	0.00	1.46	0.00	0.18	0.97	0.52
13	0.00	10.08	0.84	0.18	5.03	3.23
14	0.00	3.06	1.39	0.25	2.01	1.34
15	0.20	0.70	9.85	0.26	2.26	2.65



PROBABILIDADES DE CONTAMINACIÓN (%)					
Zona	Fuentes emisoras				
	F1	F2	F3	F4	F5
1	0.2	0	0	0.6	0
2	0.4	0	0	1	0
3	0.2	0	0	0.2	0
4	0	0.2	0.2	1.8	1
5	0	6.2	0.6	3	5.8
6	0.2	26.6	1.8	4.6	12
7	0	8.8	0.2	0.4	3.2
8	0	17.6	1.2	0.4	7.6
9	0	12.6	1.4	0.6	6.4
10	0.2	12.4	1.2	0.8	6.4
11	0.2	7.4	0.4	0.6	4.4
12	0	6.6	0	0.8	4.6
13	0	20.2	4.6	1	10.8
14	0	8.4	3.6	0.6	6.4
15	0.2	3.6	13.8	0.6	7.2