











COMITÉ DIRECTIVO

Alejandra Acuña Navarro, Viceministra de Salud del Ministerio de Salud

Haydée Rodríguez Romero, Viceministra de Agua y Mares del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)

Flora Montealegre Guillén, Directora Ejecutiva de la Fundación Costa Rica - Estados Unidos para la Cooperación (Fundación CRUSA)

José Vicente Troya Rodríguez, Representante Residente del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Kryssia Brade, Representante Residente Adjunta del PNUD

Kifah Sasa, Oficial de Programas del PNUD

ELABORADO POR

Romano Andrade, Consultor independiente

Juan Carlos Piñar, Especialista en Producción y Consumo responsables del PNUD

REVISADO POR

José Daniel Estrada, Asesor en Monitoreo y Evaluación del PNUD

Rafaella Sánchez, Especialista en Género del PNUD

Ingrid Hernández Sánchez, Asesora en Comunicación del PNUD

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Andrés Artavia, Consultor Independiente

Derechos de propiedad intelectual 2019

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – Costa Rica (PNUD - Costa Rica)
Está autorizada la reproducción total o parcial de esta publicación con propósitos educativos y sin fines de lucro, sin ningún permiso especial del titular de los derechos, con la condición de que se indique la fuente.

Dirección: Oficentro La Virgen #2, de la Embajada Americana 300m sur y 200m sureste. Pavas, San José, Costa Rica. Teléfono: (506) 2296-1544

http://www.cr.undp.org/ - Email: registry.cr@undp.org

CONTENIDO

Indice de Tablas	5
Indice de Figuras	6
Resumen Ejecutivo	12
l PARTE: Desarrollo de metodología para análisis y cuantificación de microplásticos en arena de playa	15
Introducción	15
Marco Teórico	16
Los tipos de plástico más comunes y sus usos	16
Polietileno (LDPE, HDPE, VLDPE)	16
Polipropileno	17
PET	17
Policloruro de vinilo (PVC)	17
Poliestireno	18
Poliuretanos	18
Copolímeros del acrilonitrilo con estireno, butadieno y acrilato de metilo (ABS, ABA, ASA)	18
Copolímeros de etileno y acetato de vinilo (EVA)	18
La abundancia relativa y usos de los diferentes plásticos	18
Los mecanismos de degradación de los materiales plásticos	21
Degradación térmica	22
Fotodegradación y fotólisis	23
Degradación química	24
La densidad de los plásticos y su contenido de oxígeno, nitrógeno y cloro	24
La separación de los plásticos por densidad	26
Morfología de una playa	26
La flotación o sedimentación de partículas en un medio (Ley de Stoke)	27
La evolución del plástico una vez descartado	28
La evolución del plástico en el mar	29
La evolución del plástico en la playa: degradación mecánica	31
Cómo se puede identificar un plástico	33
Espectroscopía infrarroja	33
La granulometría	36
La granulometría de la arena y la playa	36
El proceso de molienda	37
Las mareas, su frecuencia, magnitud y las mareas de primavera	38
Las mareas	38
Las mareas y la hora del día: Cuándo es marea alta y cuándo marea baja	39
La magnitud de las mareas y los ciclos naturales	39
Materiales y Métodos	42

Escogencia de cloruro de calcio para la flotación	42
La muestra	42
Playas percibidas como las más contaminadas	42
Playas Visitadas	43
Momento de toma de muestra	43
Toma de muestra	43
Conservación de la muestra	43
Separación de plásticos por flotación.	44
Fracciones de plástico y su contenido característico	44
Cuantificación de los plásticos de cada fracción	44
Tratamiento de residuos	44
Tratamiento de soluciones de cloruro de calcio usadas	44
Resultados y su Análisis	45
Playas Visitadas	45
Primera visita: Jacó y Puntarenas	45
Segunda visita: Jacó y Guacalillo	50
Tercera visita: Guacalillo y Jacó	51
Separación de plásticos por su densidad relativa	52
Separación de plásticos de la zona post-berma de Puntarenas	52
Cuantificación de los plásticos de cada fracción	52
Separación de plásticos de la Playa Jacó del 5 de mayo	52
Plásticos encontrados en Puntarenas	56
Procedimiento Validado	59
Preparación de disoluciones	59
Cloruro de calcio saturado	59
Cloruro de sodio saturado	59
Etanol acuoso densidad 0,88	59
Determinación de la densidad de las disoluciones	60
Toma de muestra	60
Conservación de la muestra	60
Separación de plásticos por su densidad relativa	60
Cuantificación de los plásticos de cada fracción	61
Fracciones de plástico y su contenido característico	63
Tratamiento de Residuos	63
Tratamiento de soluciones de cloruro de calcio usadas	63
Tratamiento de soluciones de cloruro de Sodio usadas	63
II PARTE: Costeo del análisis de microplásticos en arena de playa	64
Conclusiones Y Observaciones	65
Observaciones	65
Conclusiones específicas	65
Bibliografía	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango de densidades para polímeros comunes de relevancia ambiental.	25
Tabla 2. Velocidad relativa de partículas de diferentes radios efectivos en un medio de densidad diferente a la propia	27
Tabla 3. Playas visitadas y muestras tomadas	45
Tabla 4 Verificación de identidad de plásticos encontrados en fracciones de densidad.	63
Tabla 5: Costeo de metodología de análisis de microplásticos en arena de playa.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

llustración 1. Cantidad de plásticos utilizados en el mundo y en Europa (2015 y 2016).	19
llustración 2. Cantidad, en millones de toneladas, de los diferentes polímeros utilizados en Europa durante el 2015 y 2016.	19
llustración 3. Uso, en forma porcentual, de los diferentes tipos de plástico y sus usos característicos en Europa 2016.	20
llustración 4. Uso final de cada tipo de plástico en Europa en 2016 y la importancia relativa de cada tipo de uso.	20
Ilustración 5. Areas de una playa, según Akiyama (9)	27
llustración 6. Cantidad relativa de plásticos acarreados al océano por ríos en el mundo. Resultados de Lebreton, et al. (5).	29
Ilustración 7. Concentraciones de residuos plásticos en las aguas superficiales de los océanos del mundo.	30
llustración 8. Rangos de concentraciones de plásticos por océano.	30
llustración 9. Rangos de concentraciones de plásticos en el pacífico norte año 2014.	31
llustración 10. Histograma de la velocidad de ascenso de plásticos.	32
llustración 11. Espectro infrarrojo del Polietileno.	34
llustración 12. Espectro infrarrojo del Nylon 6.	34
llustración 13. Espectro infrarrojo del polietilenglicoltereftalato.	35
Ilustración 14. Espectro infrarrojo del polipropileno.	35
llustración 15. La magnitud relativa de las mareas en el mundo.()	38
Ilustración 16. Ejemplo de los tiempos de pleamar y bajamar para Puntarenas ()	39
llustración 17. Hora de la pleamar y la bajamar para diferentes días del 2018 en Puntarenas.	40
llustración 18. Diferencia relativa de nivel del agua entre pleamar y bajamar en Puntarenas (línea gruesa) y la luminosidad relativa de la luna durante el 2018.	41
llustración 19. Mapa de la zona de la desembocadura del río Tárcoles, Puntarenas, Costa Rica.()	43
llustración 20. Zona de rebalaje, Playa de Puntarenas.	47
llustración 21. La berma es visible al lado izquierdo de la imagen, en la zona seca de la playa, Playa de Puntarenas.	47
llustración 22. Líneas de residuos plásticos con trozos de madera dejados por una ola en una marea alta previa.	48
Ilustración 23. Zona post-berma con gran cantidad de residuos de madera y de plásticos claramente visibles.	49
Ilustración 24. Zona de poca contaminación, Playa de Puntarenas.	49
llustración 25. Plásticos evidentes en la zona post-berma de playa Guacalillo	50
llustración 26. Plásticos observados en la berma de Guacalillo.	51
llustración 27. Muestra obtenidos por flotación en etanol acuoso de la muestra obtenida en Puntarenas, en la zona post-berma, el 5 de mayo del 2018.	53
llustración 28. Flotación en agua de fracción densidad mayor a 0.9, muestra: Puntarenas post-berma.	54
llustración 29. Fragmentos de plástico obtenidos por flotación en agua, playa Puntarenas., post-berma	54

llustración 30. Fragmentos finos obtenidos por flotación en agua de la muestra de Puntarenas de post-berma.	54
llustración 31. Flotación en cloruro de calcio acuoso saturado de las muestras obtenidas en Jacó el 5 de mayo del 2018.	55
llustración 32 Aparato para disolver eficientemente las sales	59
llustración 33: Cuchara y tamiz utilizados para toma de muestra y separación de microplásticos	60
llustración 34: Recipiente apto para el almacenamiento del cloruro de calcio.	63

El contenido de cada uno de los estudios que se presentan a continuación, en el marco de la Estrategia Nacional para la Sustitución de Plástico de Un Solo Uso, por Alternativas Renovables y Compostables, forman parte del esfuerzo que interinstitucionalmente estamos desarrollando para disminuir la contaminación por plástico en nuestros ríos y mares. Esto mediante una mejor gestión de los residuos plásticos que producimos y el incentivo de la ciencia y la técnica en la transformación de materias primas de origen natural, cuya fuente no sea el petróleo, para los sustitutos al plástico de un solo uso.

Los temas que aquí se plantean permiten tener información veraz y concreta para la toma de decisiones en diferentes instancias de Gobierno Central, local, sociedad civil y empresas privadas, en pro del ambiente. Además, son vitales para que la sociedad en su conjunto ponga en práctica nuevos hábitos en dirección a ser cada vez más consumidores responsables. Desde el Ministerio de Ambiente, Energía y Aguas, valoramos las iniciativas en pro de una mejora de nuestros ríos y mares y en general en la calidad ambiental de nuestro país.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA

En el marco de la Estrategia Nacional para la Sustitución de Plásticos de Un Solo Uso por Alternativas Renovables y Compostables, se presenta el documento: "Desarrollo de metodología de análisis cuali-cuantitativo por propiedades fisicoquímicas del contenido de micro plásticos en arenas de playa para crear emprendimientos que brinden el servicio de monitoreo del contenido de micro plásticos a municipios locales y otras organizaciones interesadas" mediante la cual se brindan las herramientas metodológicas para analizar las densidades de los diferentes polímeros plásticos y determinar mediante un monitoreo de micro plásticos en arena de playas el impacto de la reducción en el consumo de los plásticos de un solo uso.

Para el Ministerio de Salud se convierte en una herramienta para analizar el impacto de los micro plásticos en la arena de las playas, dado que la granulometría en las diferentes zonas de la playa no son iguales debido a la sedimentación y al arrastre de las mismas, así como por la utilidad para medir el impacto del consumo de plásticos de otros tipos.

MINISTERIO DE SALUD

La Fundación Costa Rica - Estados Unidos de América para la Cooperación (CRUSA) como parte de su estrategia programática 2018-2022, incorpora un eje de trabajo centrado en el desarrollo de capacidades en Gobiernos locales para la gestión integral de residuos, con énfasis en aquellas centradas en la sustitución y eliminación de plásticos de un solo uso (por su afectación a los ecosistemas marinos); y aquellas que tienen un impacto en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. La intervención busca el impulso al Programa País Carbono Neutralidad 2,0 a escala cantonal y el impulso a la Estrategia Nacional para la Sustitución de Plásticos de Un Solo Uso por Alternativas Renovables y Compostables 2017-2021 en el sector privado, de sociedad civil organizada y sector público.

FUNDACIÓN COSTA RICA - ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA PARA LA COOPERACIÓN (CRUSA) Dentro de las líneas de acción para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, y específicamente en el objetivo número 12 Producción y Consumo responsables, el Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo, participa como socio de la Estrategia Nacional para la Sustitución de Plásticos de Un Solo Uso por Alternativas Renovables y Compostables 2017-2021.

El "Desarrollo de metodología de análisis cuali-cuantitativo por propiedades fisicoquímicas del contenido de micro plásticos en arenas de playa para crear emprendimientos que brinden el servicio de monitoreo del contenido de micro plásticos a municipios locales y otras organizaciones interesadas", es un aporte valioso, como herramienta científica para la identificación cuali-cuantitativa de micro plásticos en la arena de playas, y como potencial actividad para ser realizada por microemprendimientos como servicio a las instituciones y organizaciones con interés en el tema de microplásticos en el medio ambiente.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO

RESUMEN EJECUTIVO

Los materiales plásticos son arrastrados por las corrientes marinas, mar adentro o se depositan por acción del oleaje en las playas.

aquellos cuya densidad es mayor que el agua de mar, se hundirán y terminarán en el fondo de los océanos, y los que tengan densidad igual o menor al agua de mar flotarán y permanecerán a la deriva arrastrados por las corrientes marinas.

Por medio de la fotodegradación y fotólisis, degradación oxidativa, hidrólisis, termodegradación y degradación mecánica, las piezas grandes de plástico, se van convirtiendo en piezas más pequeñas al debilitar la estructura del polímero, sin embargo, estos procesos son lentos bajo la mayoría de las condiciones ambientales que se presentan en la naturaleza.

Las playas y arrecifes superficiales son los gigantescos molinos naturales, donde los fragmentos grandes de plásticos se quiebran en piezas más pequeñas. La arena de las playas sirve como agente abrasivo y de molido. De esta forma, aquellos plásticos que lleguen a depositarse cerca de las costas, son arrastrados por las olas y molidos a piezas más pequeñas.

Los polímeros plásticos con los que se fabrican la mayoría de los productos de un solo uso, tienen una densidad menor a la del agua de mar, como el polipropileno, el polietileno de baja densidad, por lo que flotan y se mantienen muy cerca de la superficie. Un objeto impactará con mayor o menor fuerza dependiendo de su masa. F= m*a, donde F es la fuerza, m la masa y a la aceleración. De esta forma, la fuerza con que impactará es directamente proporcional a su masa. Podemos afirmar que un objeto plástico de un solo uso fabricado con polímeros de baja densidad, tendrá menor masa, e impactará con menor fuerza contra otros objetos, como rocas o la arena de playa, que un objeto fabricado con polímeros de mayor densidad.

Por otro lado, los plásticos más livianos serán más fácilmente arrastrados por las corrientes marinas mar adentro, lo que implica que los microplásticos que se encuentran en las playas provienen de plásticos más densos que se hunden en agua de mar y son arrastrados por el oleaje donde entran en proceso de degradación por fricción (molienda); dicho de otra forma, los microplásticos que se encuentran en la arena de playas provienen de otros productos diferentes a los plásticos de un solo uso.

La morfología y la granulometría de la playa juega un papel muy importante en el proceso de degradación de los materiales plásticos. La arena de playa funge como agente moliente. A menor granulometría mayor la cantidad de microplásticos.

La metodología desarrollada con base en las densidades de los diferentes polímeros plásticos, y de los resultados de la validación, nos indica que los microplásticos que se encuentran en la arena de las playas, en la zona de rebalaje, corresponden a los polímeros de mayor densidad, como el PVC, el Polietilenglicol-terftalato, nylon y otros menos comunes como los copolímeros de acrilonitrilo (ASA, ABS y ABA), de los que se han encontrado en la playa de Puntarenas 46 g/m2.

Lo anterior nos indica que el monitoreo de microplásticos en arena de playas no es un parámetro adecuado para medir el impacto de una reducción en el consumo de los denominados plásticos de un solo uso que son principalmente bolsas de polietileno y polipropileno en sus diferentes variantes.

Para medir el impacto de los plásticos de un solo uso, se deben realizar muestreos en cuerpos de agua mar adentro, preferiblemente en zonas donde convergen diferentes corrientes y concentran los materiales flotantes, en especial los plásticos de un solo uso. Estos materiales, por su efecto vela, son muy fácilmente arrastrados por el agua y se encuentran, por la misma razón, a profundidades variables dependiendo del viento.

El monitoreo de microplásticos en arena de playas, no es un parámetro adecuado para medir el impacto por el cambio en el consumo de productos plásticos de un solo uso. Por el contrario, es un buen parámetro para medir el impacto de otro tipo de productos plásticos, como lo son los materiales plásticos para envasado y construcción.

La zona de una playa en donde el agua llega por acción de las olas y se regresa deslizándose se llama zona de rebalaje (swash en inglés). Es la comprendida entre la marea baja (bajamar) y la marea alta (pleamar). Aquí, el movimiento del agua descendente arrastra partículas que tienen una acción abrasiva sobre otras partículas más grandes. En otras palabras, esa es la zona de molienda de una playa.

La berma es una estructura que se encuentra en la parte superior de una playa y que se forma por las mareas severas. Las olas llegan a expulsar materiales sobre la berma solamente durante las mareas de mayor severidad. El nivel freático lentamente varía según los niveles de la marea y típicamente está por debajo del nivel de toda la berma. El límite de la zona de rebalaje se constituye como el lugar de menor altura por detrás de la cúspide de la berma. Hacia mar adentro, luego de la zona de rebalaje vemos una zona de acumulación de partículas de arena más gruesas y que tiene la forma de una grada (step) y luego de esta zona, apreciable a los bañistas en marea baja, una zona de ondulaciones. Estas dos últimas zonas no están expuestas durante la marea baja. En la zona de "Step" se dan procesos de degradación mecánica por acción de las olas, siendo las partículas más grandes acumuladas aquí también por tener la posición de menor elevación de la estructura total de la playa. El proceso por el que partículas se distribuyen verticalmente debido a su tamaño y densidad se conoce como segregación.

Las diferentes playas tienen diferencias morfo dinámicas que hacen de los procesos de degradación mecánica de rocas o plásticos y fragmentos por olas de mayor o menor intensidad. Sus mareas son de menor o mayor tamaño, el tamaño de la zona de rebalaje es mayor o menor y la zona de step de mayor o menor profundidad relativa y con olas de mayor o menor tamaño. Este documento no requiere una discusión mayor del tema, pero es de importancia para estudiar la evolución de las partículas de plástico en una playa dada en el tiempo.

La metodología desarrollada se basa en la flotación de los diferentes materiales en agua, agua – etanol, solución saturada de cloruro de sodio y solución saturada de cloruro de calcio. Por medio de la flotabilidad de los diferentes materiales, se realiza una separación de las partículas de micro plásticos entre 1 y 5 mm, que luego son retenidas en una malla 100 de acero inoxidable. Las diferentes separaciones, son secadas y pesadas.

El costo del método desarrollado es de \$200 (sin incluir viáticos), por análisis de playa y requiere una inversión de \$5000 a \$6000, de la cual la balanza de 4 decimales es la mayor inversión.

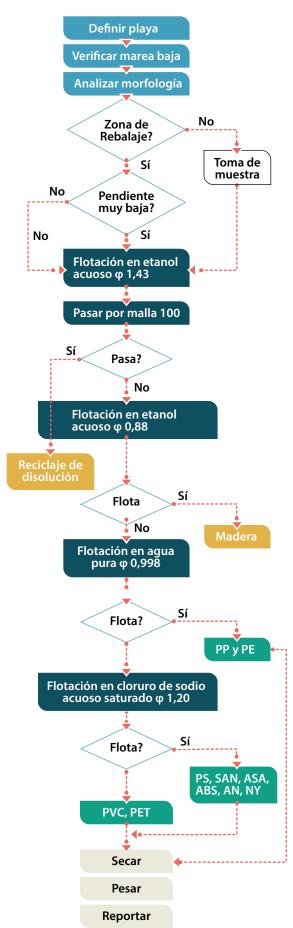


Ilustración.

Diagrama de flujo de procedimiento análisis de microplásticos en arenas de playas

Los objetivos específicos de la toma de muestra nos definen las playas de interés.

Si la muestra se toma en la zona de rebalaje se espera observar partículas muy pequeñas y con composición típicamente de plásticos otros que polietileno o prolipropileno.

Si la muestra se toma en la zona de rebalaje es en la zona de post-berma.

La pendiente de la playa nos definirá lo fino del material que se encuentra en la zona de rebalaje.

Flotación en clorurro de calcio acuoso saturado a temperatura ambiente (ϕ 1,43 mínimo). Si la granulometría de la zona es muy fina se requiere de mucho tiempo para sedimentar, lo que excluye la playa como sitio para la flotación.

La flotación y el pasar por la malla 100 se puede realizar en la playa misma por la granulometría esperada.

La solución super nadante se pasa por una malla 100. De juzgarse necesario se puede volver a realizar la flotación y volver a pasar por la misma malla. Una malla 100 tiene una apertura de 0,014 mm.

La flotación en etanol acuoso de densidad 0,88 nos da flotación de la madera y sedimentación de plásticos y otros.

Lo que pasa la malla es solución de cloruro de calcio usada que puede tener densidad menor a la deseada y se recicla restaurando y dejando que sedimente cualquier materia fina.

El mterial que flota es retirado por decantación del supernadante por una malla 100. De ser necesario se repite la flotación y el decanto.

Si tiene una densidad de 0,88 es madera. Puede haber fragmentos de poliestireno expandido o hule poroso.

Esta fracción se somete a flotación en agua para lograr la separación del polietileno y polipropileno, en todas sus formas.

La solución supernadante se pasa por una malla 100. De juzgarse necesario se puede volver a realizar la flotación y volver a pasar por la misma malla. Una malla 100 tiene una apertura de 0,014 mm. El material que se retiene en la malla está compuesto por polietileno y esta fracción se deja al aire antes de pesar.

La fracción como polietileno y polipropileno se pesa para determinar la cantidad de estos materiales presentes en la muestra.

Esta fracción se somete a la flotación en solución saturada de cloruro de calcio para lograr la separación del PET y el PVC de los otros plásticos en todas sus formas. De juzgarse necesario la operación se repite para separar todos los materiales que flotan.

La fracción que flota en cloruro de sodio saturado tiene alguna proporción de acrilonitrilo (SAN, ASA, ABS, AN) o nylon o poliestireno no expandido.

La fracción que se sedimenta en cloruro de sodio saturado está compuesta por policloruro de vinilo (PVC), sea flexible o rígido, y polietilenterftalato (PET).

La fracción se deja al aire antes de pesar.

la fracción con PS, SAN, ASA, ABS, AN y NY se pesa para determinar la cantidad de estos materiales presentes en la muestra. Por aparte se pesa la fracción con PVC y PET.

I PARTE: DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN ARENA DE PLAYA

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo el desarrollo de una metodología para monitorear los microplásticos en playas por medio de sus propiedades fisicoquímicas.

La contaminación por microplásticos en los mares y playas del mundo se ha vuelto un tema recurrente en la comunidad científica. Por convención los microplásticos son piezas de plástico de un tamaño menor a 5 mm y mayores a 1 mm.

Los microplásticos provienen de la degradación fisicoquímica de las piezas grandes de plástico que llegan a los océanos acarreados por los ríos, o residuos de microplásticos contenidos en las formulaciones de productos de cuidado personal, residuos industriales, y de aquellas piezas de plástico que son desechadas directamente a los océanos (industria, pesca, turismo), o por causa de fenómenos naturales como el tsunami el 26 de diciembre del 2004 en Indonesia o el de Japón del 11 de marzo del 2011, que aparte de la pérdida de vidas, también arrastraron miles de toneladas de residuos sólidos hacia los océanos.

Para poder desarrollar un método de monitoreo de microplásticos en arena de playas es necesario entender los mecanismos mediante los cuales una pieza plástica como un envase, una tapa, etc., se llega a quebrar en piezas cada vez más pequeñas. Igualmente, la gran cantidad, pero sobre todo la variedad de polímeros plásticos y sus mezclas en los productos finales, influyen en la resistencia de éstos a los mecanismos de degradación.

MARCO TEÓRICO

El desarrollo de un método de análisis validado, requiere de un análisis y planteamiento del problema, en términos generales y específicos, dando así la posibilidad de generar un método confiable y reproducible, que provea los resultados requeridos, objeto del presente trabajo.

A continuación, se presenta una revisión integral de los factores, que inciden en mayor o menor grado en la producción de microplásticos en la arena de playas.

El primer factor, es el tipo de material plástico (polímero) y sus propiedades físicas, por medio de las cuales se puede separar e identificar un determinado tipo de plástico en una muestra de arena de playa, como lo es la densidad con relación al agua de mar, y de las relaciones de densidades con diferentes soluciones salinas, que inciden en la flotabilidad de las partículas de plástico.

El segundo factor, es la abundancia de cada uno de estos materiales en el mundo, y sobre todo en aquellas aplicaciones que están relacionadas con productos de consumo masivo, como lo son los plásticos de un solo uso y materiales para empacado en la industria alimenticia y envasado.

El tercer factor es la relación de densidades entre el material plástico y el agua de mar, propuesta como la propiedad mediante la cual se pueden separar los distintos materiales plásticos.

Un cuarto factor a tomar en cuenta, son los mecanismos degradación mecánica de los plásticos, los procesos de molienda y la morfología de las playas.

LOS TIPOS DE PLÁSTICO MÁS COMUNES Y SUS USOS

Para poder realizar una correcta caracterización del micro-plástico en arena requerimos conocer, a grandes rasgos, los diferentes tipos de plásticos que existen. Los más comunes son el polietileno, de alta y baja densidad, el polipropileno, el polietilenglicoltereftalato (PET), el policloruro de vinilo (PVC), el poliestireno y los copolímeros de acrilonitrilo: SAN, ABS y ASA. Además, es importante conocer la importancia industrial de cada uno de estos plásticos. Esos temas se abarcan a continuación:

POLIETILENO (LDPE, HDPE, VLDPE)

El polietileno se obtiene de la polimerización del etileno, subproducto del cracking del petróleo con vapor. Se puede obtener con diferentes densidades, durezas, flexibilidad y puntos de fusión. Controlando la polimerización y utilizando diversos co-polimerizantes similares al etileno como el buteno o el butadieno se pueden obtener variantes de diferentes densidades y también el llamado polietileno lineal. Debido a que el polietileno cristalino tiene una densidad alta y es rígido y el polietileno no cristalino una muy baja densidad y es muy flexible, a medida que aumenta la densidad del polietileno aumenta su rigidez (disminuye su flexibilidad). Resiste a los solventes, aunque algunos causan hinchamiento. Todos estos productos son menos densos que el agua por lo que se tiene todo un rango de polietilenos que flotan en agua salada o dulce. Su uso típico es el de bolsas flexibles, como las que uno recibe en las farmacias, y productos moldeados. Una variante reciente es el polietileno entrecruzado que tiene características sólidas similares al PVC rígido y que

podría remplazarlo en las tuberías para agua potable. También tiene una baja densidad relativa. Se clasifica de acuerdo a su densidad, existiendo el polietileno de baja densidad (LDPE), el de alta densidad (HDPE) y el de muy baja densidad (VLDPE). Las diferencias entre ellas son el grado de entrecruzamiento, la cantidad de olefinas no etileno incluidas durante la polimerización, el tamaño de las cadenas y el grado de alineamiento existente. De esta última característica aparece el polietileno alineado que tiene resistencia al corte anisotrópico.

POLIPROPILENO

El polipropileno se obtiene de la polimerización del propileno, subproducto del cracking del petróleo y de las naftas de petróleo. Es un plástico similar al polietileno, pero más rígido y resistente. Dependiendo de su polimerización se tienen varios tipos con diferentes propiedades físicas como el sindiotáctico, atáctico e isotáctico. También puede obtenerse con diferentes grados de densidad por copolimerización. Resiste a los solventes y para fundirse requiere temperaturas altas. Tiene una resistencia al estiramiento superior a los polietilenos por lo que se utiliza en aplicaciones en donde será sometido a mayores tensiones, como bolsas de supermercado. Otros usos típicos del polipropileno incluyen los pañales desechables, billetes y recipientes para guardar comida. Fibras de polipropileno se pueden usar como aditivo en el concreto para aumentar su resistencia.

PET

El polietilenglicoltereftalato, mejor conocido como PET, es un material de excelentes características para la preservación de bebidas pues tiene muy baja permeabilidad a los gases y se ha desarrollado para que no imparta ningún tipo de olor a las bebidas, limitando en extrema el leaching de cualquier fragmento de polimerización menor. Además, la rigidez obtenida del diseño de las botellas modernas de PET permite que toleren altas presiones internas consecuentes con el envase de bebidas carbonatadas. Ha sido tal el éxito de este material que ha casi reemplazado completamente al vidrio en el envase de bebidas. Desafortunadamente, su reciclaje encuentra gran cantidad de problemas, particularmente en el área de inocuidad de los recipientes obtenidos pues la ausencia de sustancias nocivas no puede ser garantizada. De ahí que la reutilización de este material requiere fines alternativos que no son muchos. Particularmente por su dureza, alto punto de fusión y su usual contaminación con tapas de polietileno. Éstas necesarias pues la flexibilidad del polietileno permite generar tapas con cierres herméticos que pueden ser abiertos con facilidad.

POLICLORURO DE VINILO (PVC)

El policloruro de vinilo (PVC) se obtiene de la polimerización del cloruro de vinilo. Esto da un producto con excelentes características mecánicas. Es un plástico duro que puede contener cantidades variables de plastificantes que le dan un rango enorme de flexibilidades. Debido a esto es que se tienen dos clases de PVC el rígido y el flexible. El flexible tiene densidades considerablemente menores al PVC rígido. Una característica importante del PVC es que se disuelve fácilmente en algunos solventes dando lugar a "pegamentos" y a la posibilidad de reciclarle por disolución con recuperación del solvente. Esto es complicado por la presencia de plastificantes de diverso origen. Su destrucción en hornos cementeros no es una práctica aceptable pues su contenido de cloro es incompatible con la producción de cemento.

POLIESTIRENO

Es el producto de la polimerización del estireno. Debido a la presencia de grupos "aromáticos", de mayor densidad al etileno dentro de su estructura. Tiene una densidad superior al polietileno. El polímero puede ser sólido o en forma de espuma (expandido). Esta última se característica por su muy baja densidad al tener burbujas de gases atrapados dentro de su estructura. El poliestireno sólido se ha utilizado para producir rasuradoras, estuches de CD's y materiales parecidos y el poliestireno expandido (espuma) se ha utilizado para vasos y platos desechables, bandejas para carnes, pellets para empaque de materiales frágiles como televisores y otros. En Costa Rica la espuma de poliestireno se conoce como "estereofón" que es una adaptación idiomática de "polystyrene foam".

POLIURETANOS

Otro material que se puede obtener en forma de espuma es el poliuretano. Se obtiene por polimerización de un diisocianato con un glicol. La naturaleza del diisocianato y del glicol puede variar, aunque predomina el terftalildiisocianato y el etilenglicol. Su principal uso es en colchones de espuma. Debido al gran contenido de gases en su estructura tiene una densidad relativamente baja y flota. Si los gases que contiene son desplazados por líquido tenderá a hundirse. Es un material muy difícil se separar exitosamente.

COPOLÍMEROS DEL ACRILONITRILO CON ESTIRENO, BUTADIENO Y ACRILATO DE METILO (ABS, ABA, ASA)

Todos estos polímeros comparten la propiedad de utilizar Acrilonitrilo (A) y son relativamente más densos que los polietilenos y los polipropilenos. El ASA es poli Acrilonitrilo (A)-Estireno (S)-Acrilato de metilo (A). El ABA es poli Acrilonitrilo (A)-Butadieno (B)-Acrilato de metilo (A) y utiliza butadieno en lugar de estireno. El ABS es poli Acrilonitrilo (A)-Butadieno (B)-Estireno (S) y utiliza butadieno en lugar de acrilato. Estos polímeros tienen una gran variedad de posibles composiciones y por lo tanto muchas diferentes aplicaciones. Debido a la combinación de monómeros usados sus aplicaciones incluyen materiales con un gran rango de temperatura de uso y además un rango de densidades relativas también. Siendo todas similares y superiores a la unidad.

COPOLÍMEROS DE ETILENO Y ACETATO DE VINILO (EVA)

Se obtiene de la copolimerización de etileno y acetato de vinilo. Un ejemplo típico de este material son las suelas de los zapatos "tipo tennis". Tiene características elásticas muy importantes.

LA ABUNDANCIA RELATIVA Y USOS DE LOS DIFERENTES PLÁSTICOS

La abundancia relativa en el mundo de los diferentes plásticos tendrá un impacto en la cantidad de cada plástico que podríamos esperar que llegue a nuestros mares. Un estudio Europeo del 2017 () tiene varias infografías muy ilustrativas a tal efecto que se muestran en llustración 1, llustración 2, llustración 3 e llustración 4.

La Ilustración 2 nos muestra la cantidad relativa de los diferentes polímeros utilizados en Europa durante el 2015 y 2016. En ellas vemos claramente el dominio del polietileno y el polipropileno en todas sus formas, el PVC el PUR y el PET. Entre estos plásticos se considera el 74% del total de plásticos producidos y utilizados en Europa. Siendo los demás relativamente menores en importancia por comparación.

Ilustración 1. Cantidad de plásticos utilizados en el mundo y en Europa (2015 y 2016).

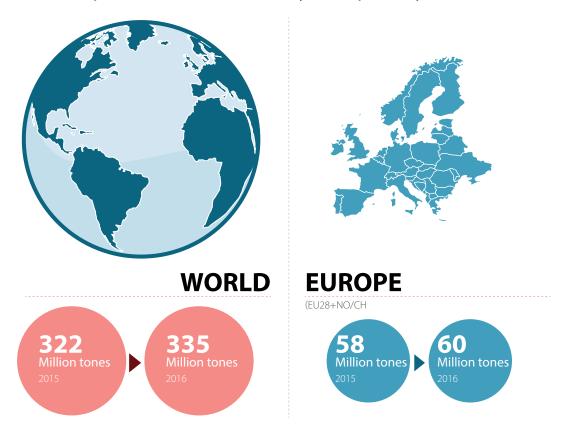


Ilustración 2. Cantidad, en millones de toneladas, de los diferentes polímeros utilizados en Europa durante el 2015 y 2016.

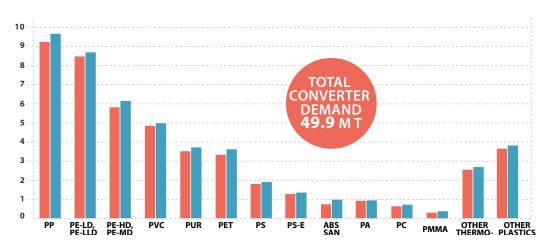


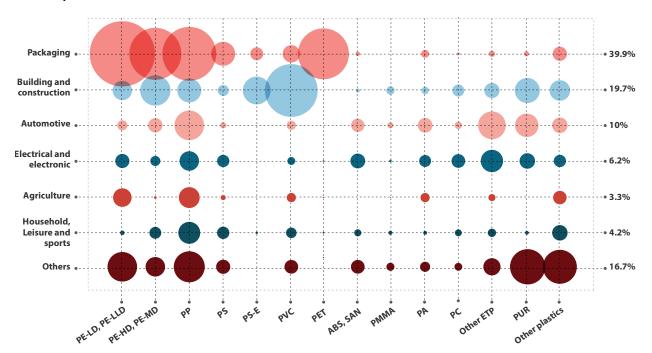
Ilustración 3.

Uso, en forma porcentual, de los diferentes tipos de plástico y sus usos característicos en Europa 2016.



Ilustración 4.

Uso final de cada tipo de plástico en Europa en 2016 y la importancia relativa de cada tipo de uso.



En la llustración 3 podemos ver el uso en forma porcentual y los usos característicos. El polipropileno y el polietileno se utilizan principalmente para fines de empaque y el PVC en construcción, y en la llustración 4 podemos ver el uso que se le da a cada plástico, pudiendo notar que el polietileno y el polipropileno tienen varios usos que incluyen de forma importante los materiales de empaque, siendo este uso casi el 40% del destino final de todos los plásticos. El PVC se usa casi exclusivamente en construcción con algunas aplicaciones de empaque y en automóviles y el PET usado casi exclusivamente para empaque.

LOS MECANISMOS DE DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

Los polímeros están constituidos de macromoléculas de alto peso molecular. Estas macromoléculas se forman a partir de la repetición (encadenamiento) de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

Es importante diferenciar los materiales que denominamos plásticos de los elastómeros. Estos últimos son polímeros, se distinguen por ser elásticos, propiedad que les permite expandirse por acción de una fuerza o tracción y recuperar su forma y tamaño original al desaparecer esta fuerza que se ejerce sobre el mismo.

Los polímeros plásticos y elastómeros se pueden clasificar por su estructura, composición química, su uso final y por su reacción a las condiciones ambientales. La estructura, composición química determinarán la reacción (resistencia), de este material cuando queda expuesto a las condiciones del medio ambiente.

La degradación de un polímero se puede dar por efectos de la temperatura, de la radiación, por acción de agentes químicos y por acción mecánica. Estos mecanismos en el medio ambiente rara vez se presentan en forma aislada, por lo que la degradación de un polímero en la naturaleza es producto de todos ellos en conjunto, en mayor o menor grado dependiendo de las condiciones que se den.

No hay que descartar las fuentes termales de origen volcánico, se pueden tener temperaturas altas, y concentraciones de ácido sulfúrico. Otros mecanismos pueden intervenir en la degradación de los plásticos, uno de ellos es la presión, la cual aumenta conforme se desciende en el océano. Sin embargo, la mayor y las condiciones químicas como acidez en las cercanías de fuentes termales.

Ilustración.

Principales familias de los polímeros

Polímero	Familia
	Polietileno
	Polipropleno
	Poliestireno
	Cloruro de Polivinilo (PVC)
	Politetrafluroetileno (Teflón)
	ABS (Lustran)
	Poliamidas (Nylon)
	Acrílicos (Pexiglass, Perpex, Lucite)
Plásticos	Acetatos
	Acetatos de celulosa
	Policarbonatos
	Poliésteres
	Fenólicos (Bakelita)
	Fenólicos laminados (Formica)
	Urea-melamina
	Uretanos (Espumas)
	Epóxicos (Araldite)
	Siliconas
	Isopreno natura
	Polibutadieno
	Estireno-butadieno
Elastómeros	Cloropreno
	Polisulfuro
	Poliuretanos
	Etileno/acrílico

Fuente Beatriz Posada (18)

DEGRADACIÓN TÉRMICA

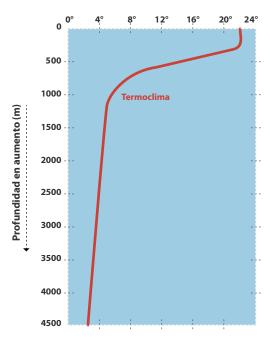
La mayoría de los polímeros, por no decir todos, son estables a temperatura ambiente, y empiezan a deteriorarse a temperaturas superiores a su punto de fusión. La temperatura de fusión de los materiales para inyección de plásticos varía según el tipo de polímero. Los polímeros amorfos funden entre los 130 y los 160 grados como el poliestireno y el cloruro de polivinilo. Los policarbonatos funden a más de 200 grados centígrados, el polietileno funde a los 100 grados centígrados. (21)

Lo anterior implica, que, a temperatura ambiente, el 100% de los materiales plásticos comerciales no sufrirán termodegradación y podemos descartar este mecanismo, como importante en la transformación de objetos plásticos en microplásticos.

En el océano, las condiciones tampoco favorecen para nada la termodegradación. La termoclima es una zona o rango de profundidad donde la temperatura del agua disminuye muy rápidamente a medida que se desciende. Al final de esta zona, la temperatura se mantiene prácticamente constante hasta llegar a los miles de metros. Para latitudes medias, la termoclina se encuentra entre los 200 y los 1000 metros de profundidad.

Ilustración.

Perfil vertical típico de una termoclima (20)



FOTODEGRADACIÓN Y FOTÓLISIS

La fotodegradación se da por acción de la radiación sobre los polímeros. La mayoría de los polímeros plásticos interaccionan con la radiación ultra violeta UV y generan reacciones químicas. La energía de la radiación UV le permiten interaccionar con grupos funcionales presentes en los polímeros, ya sea en la molécula del polímero o en los diferentes aditivos que se le cargan en el proceso de fabricación.

La radiación solar que llega a la superficie de la tierra va desde los 290 a los 3000 nm. Pero la mayoría de los polímeros por el tipo de grupos funcionales y sus enlaces: C-C, C-H, C-O, C-CL, C-N, absorben longitudes de onda menor a los 300 nm.

Durante el proceso de absorción de la radiación, la molécula pasa de un estado de energía inferior a uno superior, de esta forma se generan iones radicales que reaccionan permitiendo la fotólisis. En este proceso también se da un entrecruzamiento de las mismas macromoléculas.

Cuando este proceso de fotólisis se da en presencia de oxígeno ocurre un proceso de oxidación, mediante el cual se van fragmentando los polímeros. Para evitar esta degradación los fabricantes le agregan a los polímeros diferentes tipos de aditivos, como protectores UV: filtros de luz, antioxidantes, absorbentes de UV y enfriadores de estados exitados (22). además de contener rellenos como colorantes que son los primeros en reaccionar con la radiación, funcionando como compuestos de sacrificio.

Asi las cosas, la mayoría de los polímeros tendrán gran resistencia a la radiación, por lo que también es un mecanismo lento que necesariamente tiene que combinarse con otros procesos químicos.

En el caso de materiales plásticos que flotan en la superficie, éstos serán expuestos a la radiación visible y UV, pero aquellos que se hunden, el cuerpo de agua que los rodea juega el papel de escudos disipando la radiación. Solo un 1% de la radiación solar llega a una profundidad de 200 metros de profundidad en el mar. Esto quiere decir que un plástico que se encuentre a esas profundidades, la degradación por radiación y por temperatura es prácticamente nula y debido al descenso de la temperatura, únicamente los mecanismos químicos y mecánicos serán los responsables de la transformación de plásticos en microplásticos. Esto implica que la fotodegradación será importante solo en aquellos materiales plásticos que estén en la superficie del mar o flotando y que no cuenten en su formulación protectores contra UV.

DEGRADACIÓN QUÍMICA

La degradación química de un plástico está condicionada a la exposición del polímero a agentes químicos, como disolventes, ácidos o bases. Dependiendo del tipo de polímero, así tendrán mayor o menor estabilidad.

Lo cierto es que en la naturaleza un plástico no se ve expuesto a ninguno químico que no sea el agua dulce y agua salada. Por lo anterior también la degradación química no juega un rol importante en la degradación del plástico a microplásticos.

Así que la hidrólisis es el único mecanismo de degradación química que juega un papel importante en la degradación de los plásticos. La hidrólisis se da en la superficie de los polímeros, y esta dependerá de la afinidad del polímero por el agua. La absorción del agua no se da de forma uniforme, y provoca presión y tensión en las capas internas del polímero, provocando la ruptura de las cadenas del polímero. Ahora bien, la mayoría de los polímeros plásticos son hidrofóbicos, es decir no tienen afinidad por el agua.

LA DENSIDAD DE LOS PLÁSTICOS Y SU CONTENIDO DE OXÍGENO, NITRÓGENO Y CLORO

La densidad de los plásticos depende de su composición molecular y los elementos que lo constituyen. Los plásticos que solamente contienen carbono e hidrógeno, como todos los polietilenos, el propileno y el poliestireno tienen las densidades más bajas. Los plásticos con un contenido de oxígeno o nitrógeno son los siguientes en densidad e incluyen el polietilenglicoltereftalato (con oxígeno), el nylon otras poliamidas y el poli acrilonitrilo y sus copolímeros como el ASA, ABS y ABA (con oxígeno y nitrógeno). Finalmente, los plásticos de mayor densidad son los que contienen cloro en su estructura. El más común de estos es el PVC, en sus variantes flexibles y rígidas. Finalmente, el sarán, polímero obtenido del 1,1-dicloroetileno, es el que tiene la mayor densidad relativa de todos, 1,63.

Uno de los principales problemas del reciclaje de materiales plásticos recuperados de desecho es la heterogeneidad de su composición. Debido a esto la mayoría de los plásticos recuperados no se recicla pues requiere de una laboriosa separación. Se han planteado sistemas de separación ciclónica utilizando justamente la diferencia de densidad de los materiales (). Estos sistemas solamente funcionan si el tamaño de las partículas es relativamente similar y no son sistemas de separación eficientes para muestras ambientales.

Gent, et al., indican que la densidad ha sido ampliamente utilizada para la separación de residuos plásticos y Avio, et al. (), nos dan las densidades relativas de polímeros de importancia ambiental. Con esta información se puede confeccionar la Tabla 1 que nos muestra la flotabilidad de diferentes plásticos en varios medios.

Una forma de evitar la separación manual de residuos es recurrir a la recuperación energética de los residuos plásticos. Holcim tiene permiso para coprocesar materiales en su horno cementero y esta es una excelente forma de disponer de materiales de difícil recuperación. Sin embargo, la incineración del PVC produce residuos de cloruro en el cemento que disminuyen su resistencia mecánica. Es por esto que el PVC no puede ser destruido en un horno cementero en operación comercial y por tanto limita la destrucción de residuos plásticos por este medio. Un problema adicional de la incineración del PVC es la posible producción de dioxinas, lo que llevó al Ministerio de Salud a prohibir, de forma expresa, el uso de PVC como combustible alterno en hornos cementeros (4).

Tabla 1.
Rango de densidades para polímeros comunes de relevancia ambiental.

Flotabilidad	Tipo de Plástico	Densidad relativa
Flotan en Agua pura (densidad 0,998)	Poliestireno expandido (PSE): Contiene carbono e hidrógeno, con anillos aromáticos. Tiene gran cantidad de orificios llenos de aire.	0,016-0,640
	Polietileno: Contiene solamente carbono e hidrógeno.	0,93-0,98
	Polipropileno: Contienen solamente carbono e hidrógeno.	0,89-0,91
	Poli etileno-acetato de vinilo (EVA): Contiene carbono, oxígeno e hidrógeno.	0,93-0,95
Flotan en Solución saturada de cloruro de sodio a 25°C (1.202)	Poliestireno (PS): Contiene carbono e hidrógeno, con anillos aromáticos.	1,04-1,11
	Copolímeros del estireno SAN, ASA y ABS: Contienen carbono, hidrógeno y nitrógeno. El nitrógeno en cantidades variables.	1,00-1,09
	Acrilonitrilo: contiene carbono, hidrógeno y nitrógeno	1,06
	Nylon y poliamidas: contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.	1,13-1,5
	Policarbonato: contiene carbono, hidrógeno y oxígeno.	1,20
Flotan en Solución de cloruro de calcio (densidad 1,36)	PVC flexible: contiene carbono, cloro e hidrógeno con algún plastificante que contiene cantidades variables de oxígeno	1,24
Flotan en Solución saturada de cloruro de calcio a 25°C	Polietilenglicoltereftalato (PET): contiene carbono, oxígeno e hidrógeno con gran cantidad de anillos aromáticos. El contenido de oxígeno es alto	1,38-1,39
(densidad 1,45)	PVC rígido: contiene carbono, cloro e hidrógeno.	1,42-1,45

LA SEPARACIÓN DE LOS PLÁSTICOS POR DENSIDAD

El método de separación de residuos plásticos por densidades mencionado arriba se basa en la diferencia de densidades de los diferentes materiales y la posibilidad de preparar disoluciones de sales con diferentes densidades también. Si el material tiene una densidad inferior al medio flotará, sino se hundirá. Realizando separaciones consecutivas una muestra puede separarse en los diferentes materiales que luego pueden caracterizarse. Con base en los datos de la Tabla 1 se puede pensar en una separación por densidad secuencial. A una muestra se le extraen los plásticos presentes suspendiéndola en una solución de cloruro de calcio saturada. Los plásticos que flotan se separarían y se dispersarían en una solución no saturada de cloruro de calcio para separar primeramente los PVC rígidos y los PET que se sedimentarían y por tanto serían separados del resto. Los residuos flotantes resultantes se dispersarían en una disolución de sal (cloruro de sodio) saturada a 25°C en donde el PVC flexible se sedimentaría. Posteriormente, los residuos flotantes se dispersarían en agua permitiendo que los copolímeros de estireno y acrilonitrilo se sedimentaran y los polietilenos y polipropilenos flotarían. Es en extremo improbable que en una muestra de arena encontremos muestras de poliestireno expandido (PSE) y también poco probable que encontremos polietilenos y polipropilenos en gran cantidad tampoco. Esto debería de verificarse experimentalmente.

MORFOLOGÍA DE UNA PLAYA

La zona de una playa en donde el agua llega por acción de las olas y se regresa deslizándose se llama zona de rebalaje ^a). Esta zona es llamada Swash en inglés y puede apreciarse en la llustración 5 (⁵). Es la comprendida entre la marea baja (bajamar) y la marea alta (pleamar) (^b). Aquí, el movimiento del agua descendente arrastra partículas que tienen una acción abrasiva sobre otras partículas más grandes.

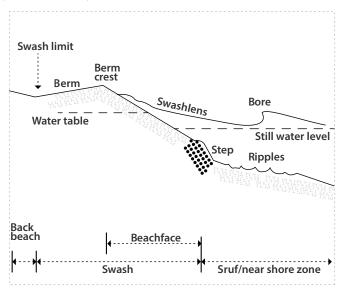
En la misma ilustración podemos ver otras áreas de la playa como lo es la berma. Esta es una estructura que se encuentra en la parte superior de una playa y que se forma por las mareas severas. Las olas llegan a expulsar materiales sobre la berma solamente durante las mareas de mayor severidad. El nivel freático lentamente varía según los niveles de la marea y típicamente está por debajo del nivel de toda la berma. El límite de la zona de rebalaje se constituye como el lugar de menor altura por detrás de la cúspide de la berma (Ilustración 5). Hacia mar adentro, luego de la zona de rebalaje vemos una zona de acumulación de partículas de arena más gruesas y que tiene la forma de una grada (step) y luego de esta zona, apreciable a los bañistas en marea baja, una zona de ondulaciones. Estas dos últimas zonas no están expuestas durante la marea baja. En la zona de "Step" se dan procesos de degradación mecánica por acción de las olas, siendo las partículas más grandes acumuladas aquí también por tener la posición de menor elevación de la estructura total de la playa. El proceso por el que partículas se distribuyen verticalmente debido a su tamaño y densidad se conoce como segregación.

⁽a) la zona típicamente húmeda de la playa

⁽b) La zona de marea alta y marea baja cambian a lo largo del año dependiendo del ciclo lunar y solar pues en diferentes momentos la luna y la tiene tienen diferentes distancias a la tierra y además posiciones diferentes una y el otro respecto a si mismo. Eso hace de las mareas un sistema altamente variable, pero predecible.

Las diferentes playas tienen diferencias morfo dinámicas que hacen de los procesos de degradación mecánica de rocas o plásticos y fragmentos por olas de mayor o menor intensidad. Sus mareas son de menor o mayor tamaño, el tamaño de la zona de rebalaje es mayor o menor y la zona de step de mayor o menor profundidad relativa y con olas de mayor o menor tamaño. Este documento no requiere una discusión mayor del tema, pero es de importancia para estudiar la evolución de las partículas de plástico en una playa dada en el tiempo.

Ilustración 5. Áreas de una playa, según Akiyama (9)



LA FLOTACIÓN O SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS EN UN MEDIO (LEY DE STOKE)

Toda partícula que se encuentra en un medio con una densidad diferente a la propia tenderá a flotar o a sedimentarse. La velocidad a la que lo hace determina la estabilidad de dicha partícula en ese medio. La velocidad que dicha partícula tiene en el medio depende de varios factores como la viscosidad del medio, la diferencia de densidad entre la partícula y su entorno y el cuadrado del radio efectivo de la partícula. Esto hace que la flotación o sedimentación de partículas en extremo pequeñas (radios efectivos muy pequeños) no sea práctico.

Por ejemplo, las gotas de agua de las nubes no caen mientras tengan un tamaño lo suficientemente pequeño. Si la gota aumenta de tamaño tiende a caer y finalmente cae como lluvia. La ecuación que determina la velocidad que tendrá una partícula en un medio indica que la velocidad será proporcional al cuadrado del radio de la partícula. Siendo esto así un fragmento de plástico de menos de 0,1 mm de diámetro tendrá una sedimentación tan lenta que se la llevará el agua de mar. Una partícula con un diámetro de 1 mm se sedimentará 100 veces más rápido que una de 0,1 mm y una de 5 mm lo hará 2500 veces más rápido (Tabla 2). De ahí que la búsqueda de partículas de menos de 0,1 mm en la arena no tiene sentido y por eso todas las muestras de arena deberán de lavarse en una malla 200 (tamaño de orificio de 0,074 mm) para eliminar todo material menor a ese tamaño que podría interferir con la separación de microplásticos por densidad.

Tabla 2. Velocidad relativa de partículas de diferentes radios efectivos en un medio de densidad diferente a la propia

mm	Velocidad relativa	
5	1	250.000
1	0,04	10.000
0,1	0,0004	100
0,01	0,000004	1

La velocidad a la que se sedimenta un plástico en el mar dependerá de su densidad relativa a la del agua de mar. Si es más denso que el agua de mar tenderá a sedimentarse y mientras más diferente las densidades más rápidamente lo harán. De esto es de esperar que los fragmentos de microplásticos más pequeños que se encuentran en una playa tiendan a ser de plásticos más densos como el PVC y los menos densos tenderán a ser de mayor tamaño, una hipótesis a verificar.

Reisser et al. () nos presentan un estudio de la flotabilidad de diversos tipos de plástico en la zona de giro del atlántico norte. Sus resultados de interés para nosotros se muestran en la llustración 10. Es de particular interés el ver como las partículas de menor tamaño tienen menores velocidades de ascenso que las de mayor tamaño (parte A) y como las partículas con forma de filamentos o de hojas tienen a tener velocidades de ascenso menores a las partículas con forma esférica (parte B). Consecuentemente las partículas de menor velocidad de ascenso se encuentran a mayores profundidades (parte C). De lo anterior se confirma la necesidad de generar un sistema de separación por densidades que considere partículas con sedimentación o flotación a velocidades apropiadas. Esto se logra considerando partículas de dimensiones entre los 0,1 mm y los 5 mm de tamaño, las mismas que hemos definido como microplásticos.

LA EVOLUCIÓN DEL PLÁSTICO UNA VEZ DESCARTADO

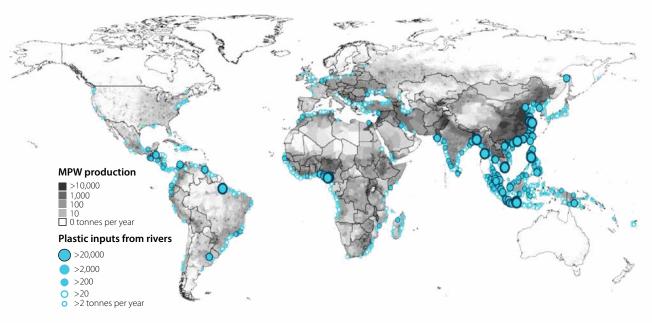
Una vez descartado un plástico en Costa Rica, este puede tener diferentes destinos. Puede llevarse a un relleno sanitario adonde será "sepultado". Puede quedar a la intemperie para terminar en un campo semi enterrado, o puede llegar a un rio en donde fluirá hacia el océano. Durante ese viaje sufrirán procesos de degradación fotolítica y mecánica para dar fragmentos cada vez más pequeños y quebradizos. Debido a la flotabilidad de los productos menos densos que el agua, éstos avanzarán más rápidamente hacia el mar. Las partículas de plástico más densas probablemente se atorarán en el fondo de los ríos hasta que corrientes suficientemente fuertes las arrastren rio abajo.

En Costa Rica la mayor densidad de población se encuentra en el valle central, dando como consecuencia que los principales contaminantes llegan por los ríos que salen de este, particularmente el Tárcoles.

Lebreton, et al. (7), han estimado la contaminación de plásticos que acarrean los ríos al mar y sus resultados se pueden ver en la llustración 6. De los 20 principales ríos más

Ilustración 6.

Cantidad relativa de plásticos acarreados al océano por ríos en el mundo. Resultados de Lebreton, et al. (5).



contaminantes del mundo 10 se encuentran en Asia. Sin embargo, Centroamérica no está exenta de contaminar de forma importante para el tamaño de nuestra población. Sus estimaciones son de más de 200 toneladas de plásticos llegan al mar procedentes de Costa Rica, siendo las mayores contribuciones durante los meses más lluviosos (v).

LA EVOLUCIÓN DEL PLÁSTICO EN EL MAR

La distribución de partículas de plástico en el mar varía debido a dos condiciones: la densidad del material y las corrientes marinas. Los productos menos densos que el agua de mar se moverán en la zona superficial encontrándose a profundidades variables en función del viento. El estudio de Kooi et al. (8) ha relacionado la distribución de las partículas plásticas en aguas superficiales en función de su densidad, tamaño y el número de Beaufort^c. Las partículas de plástico más densas que el agua de mar tenderán a sedimentarse y ser arrastradas por las corrientes marinas para finalmente llegar, algunas de ellas, a las playas.

Cózar, et al. (*), nos presentan los resultados de mediciones de partículas de plástico encontradas en el mar abierto a lo largo de todos los mares. Sus resultados se muestran en la llustración 7. En ella los círculos coloreados (legenda en la parte superior derecha). El mapa muestra las concentraciones promedio de 442 sitios (1127 muestras de arrastre). Las áreas grises indican las zonas de acumulación predichas por el modelo de circulación superficial mundial. Los colores gris oscuro y claro representan las zonas internas y externas de acumulación, respectivamente. Las zonas en blanco se consideran zonas de no acumulación. Podemos ver, claramente en ella, como se han conformado zonas de acumulación de plásticos en zonas oceánicas en donde hay corrientes de circulación. Siendo las más notables las del pacífico norte y las del atlántico sur y norte. También nos

⁽c) Número que caracteriza los vientos y su efecto sobre el mar.

dan datos de la cantidad relativa de partículas en zonas de no circulación, en los bordes de zonas de circulación y en las zonas internas a la circulación. Estos valores se pueden ver en la llustración 8. De forma análoga, Law, et al. (10), reportan una zona de acumulación en el pacífico norte con grandes zonas libres de residuos flotantes llegando a encontrar más de 800.000 piezas de plástico por kilómetro cuadrado. En las aguas territoriales de Costa Rica encontraron menos de 5.000 piezas de plástico por kilómetro cuadrado (u/km2) en algunas muestras y entre 5.000 y 10.000 u/km2 en otras muestras. Sus datos se muestran en la llustración 9. Esto demuestra como nuestras aguas no son de alta concentración pero que las corrientes llevan estos residuos y los terminan acumulando en la gran masa de partículas del pacífico norte.

Ilustración 7.
Concentraciones de residuos plásticos en las aguas superficiales de los océanos del mundo.

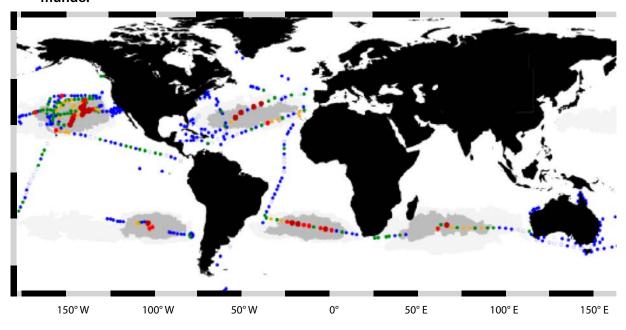


Ilustración 8

Rangos de concentraciones de plásticos por océano. Las zonas de no acumulación se muestran en azul, otras zonas de acumulación en verde y las zonas de acumulación en rojo. Los bordes de las cajas muestran los percentiles 25 y 75. Las líneas negras dentro de las cajas muestran el promedio y los bigotes abajo y arriba de las cajas muestran los percentiles 90 y 10.

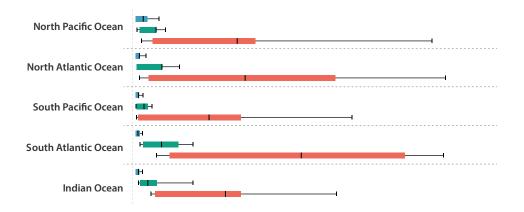
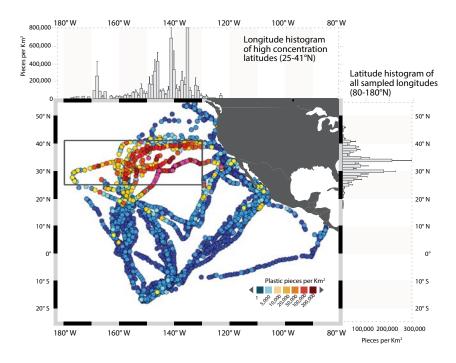


Ilustración 9. Rangos de concentraciones de plásticos en el pacífico norte año 2014.



LA EVOLUCIÓN DEL PLÁSTICO EN LA PLAYA: DEGRADACIÓN MECÁNICA

La fuerza con que un objeto impacta otro, es directamente proporcional a la masa y a la aceleración del objeto mismo: F= m*a, donde F es la fuerza, m la masa y a la aceleración. De esta forma, la fuerza con que impactará es directamente proporcional a su masa. Podemos afirmar que un objeto plástico de un solo uso, que es fabricado con polímeros de baja densidad como polisestireno, poliestireno expandido (estereofón), polietileno de baja densidad, tendrán menor masa, e impactarán con menor fuerza contra otros objetos, como rocas o la arena de playa. Por el contrario, un objeto fabricado con polímeros de mayor densidad, tienen mayor masa y la fuerza de impacto es mayor.

Al llegar una partícula de plástico a una playa, ésta se puede localizar en varios lugares diferentes de la misma. Si su densidad es superior al del agua de mar pueden situarse en la zona de rebalaje en donde las olas que han roto generan movimiento de agua desde la marea baja hasta la marea alta. Aquí podrán sufrir un proceso de degradación mecánica por acción de la arena que está en constante movimiento.

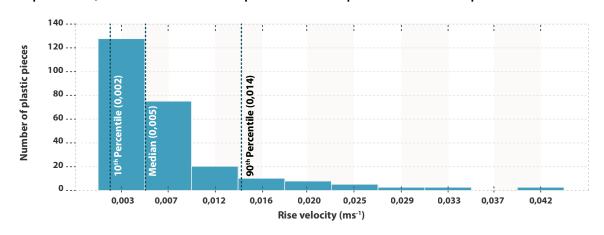
Una vez llegada una partícula de plástico a la zona de rebalaje o de la zona de Step, esta sufrirá el embate de las olas causando una degradación mecánica que generará partículas de plástico cada vez menores. Ese embate será mucho más continuo en las zonas de rebalaje que tienen una acción de olas mucho más constante ("beachface", llustración 5). Esta acción es una de "lijado" de la partícula de plástico con partículas de arena. Este proceso se da pues al bajar el agua de una ola previa arrastra arena y plásticos que rozan y tienen un efecto de lijado sobre el plástico. De ahí que muchas veces se encuentran partículas con geometría redondeada.

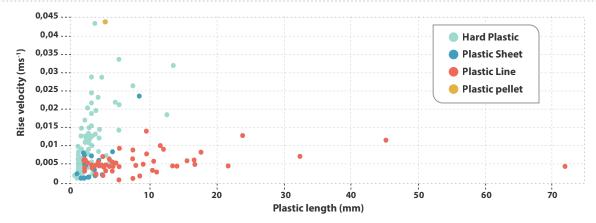
Desde La parte superior de la berma hasta la sección trasera del rebalaje no lo tienen y por eso las partículas de plástico que lleguen a este lugar no sufrirán un proceso de degradación severo y pueden perdurar durante mucho más tiempo que las partículas que se encuentran en la zona de "beachface".

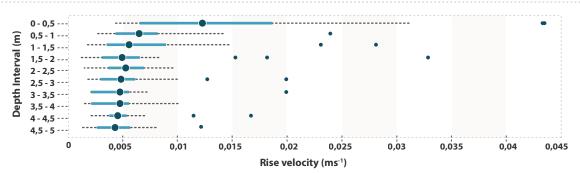
Las partículas de plástico de un tamaño lo suficientemente pequeño no llegarán a sedimentarse y serán arrastradas por el las corrientes mar adentro. Es por esto que las partículas de plástico que podemos encontrar en una playa tienen un límite inferior. De ahí que los fragmentos de plásticos hallados en la playa se conocen como microplásticos y los definiremos como aquellos que un tamaño menor a los 5 mm, pero mayor a los 0.1 mm, siendo los mayores de 5 mm como macroplásticos que son fácilmente visibles.

Ilustración 10.

Histograma de la velocidad de ascenso de plásticos. Velocidad de varios plásticos vs. tamaño del plástico. B) velocidad de ascenso vs. forma de la partícula C) velocidad de ascenso vs. profundidad a la que fue encontrada la partícula.







CÓMO SE PUEDE IDENTIFICAR UN PLÁSTICO

Las características físico químicas que permiten identificar, sin conocimiento a priori, la naturaleza de un plástico son muy pocas. La técnica más certera es el uso de la espectroscopia infrarroja para, por comparación con espectros de absorción reportados, identificar un plástico. Sin embargo, por su costo y disponibilidad, no es una opción viable, en el entendido de que se requiere de una metodología de bajo costo para poder reproducirla de forma intensiva en todas las playas del país, objeto final del presente trabajo. Sin embargo, la espectroscopia IR, es un mecanismo idóneo para la validación del proceso de separación e identificación por densidades.

ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA

La espectroscopia infrarroja es una técnica muy utilizada para identificar sustancias. Consiste en medir la intensidad de un haz de luz en la frecuencia conocida como infrarroja. La cantidad de energía absorbida por una muestra vs. la energía de la radiación es lo que se conoce como el espectro infrarrojo. Este espectro es característico de cada sustancia y nos da información sobre la constitución molecular específica. Los llamados grupos funcionales, partes de las moléculas con enlaces químicos característicos de su reactividad, tienen absorciones de la luz infrarroja a energías específicas. En la zona de alta energía del espectro se observan las absorciones debidas al estiramiento de los grupos funcionales y en la zona de baja energía los asociados al movimiento simultáneo de doblamiento de grupos estructurales grandes. El análisis detallado del espectro nos permite identificar los grupos funcionales presentes en cada muestra. Como cada plástico tiene diferentes grupos funcionales, esto nos permite identificar el plástico en particular. Estas características del espectro infrarrojo de cualquier sustancia hacen que dicho espectro sea básicamente una huella digital y por eso permite la identificación inequívoca de cada sustancia. La llustración 11, del polietileno, llustración 12, del nylon 6, llustración 13, del PET y la llustración 14, del polipropileno, (11,12,13), son ejemplos típicos de los espectros infrarrojos de los principales plásticos.

En los diferentes espectros se pueden apreciar diferencias significativas por la ausencia o presencia de las absorciones específicas de los grupos funcionales de cada tipo de polímero. Esto permite que los diferentes compuestos sean claramente identificados. Un análisis de espectros obtenidos de fragmentos de plástico permite la identificación de cada pieza de plástico de forma no ambigua y específica. Por ejemplo, el estiramiento de un grupo C=O, presente en una amida como el Nylon 6 y el PET, tienen diferentes energías, siendo la primera a 1634 y la segunda a 1730. Estas diferencias tienen razón de ser estructural que se correlaciona con la estructura específica del Nylon 6 y el grupo éster del polietilenglicoltereftalato. Permitiendo reconocer si una muestra es Nylon o PET. Esto es así para todos los diferentes plásticos. El polietileno, por ejemplo, no tiene las absorciones que tiene el polipropileno pues en el PE no existen los grupos metilos abundantes en el PP. Por eso la zona de estiramiento C-H será mucho más compleja en un PP que en un PE. En el espectro infrarrojo del polietileno (Ilustración 11) se observan las absorciones a 2915, 2848, 1471 y 1463 cm-1, correspondientes a los estiramientos asimétricos y simétricos y las flexiones asimétricas y simétricas de los grupos metileno presentes en el polietileno. Esta diferencia también permite la cuantificación de la cantidad de polietileno presente en una muestra de polipropileno. En el espectro infrarrojo del Nylon 6 puede notarse (Ilustración 12) pueden apreciarse las absorciones a 3285 y 3066 cm-1 correspondientes a los estiramientos asimétricos y simétricos del grupo NH de la amida y la absorción a 1634 correspondiente al estiramiento del grupo amida. Las absorciones a 2932, 2860, correspondientes a los estiramientos asimétricos y simétricos de los grupos metileno, muy similares en ubicación a las correspondientes del polietileno.

Ilustración 11. Espectro infrarrojo del Polietileno

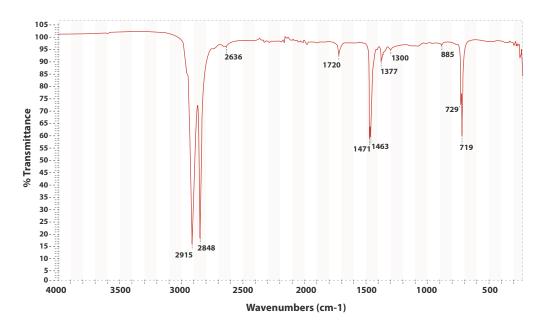


Ilustración 12. Espectro infrarrojo del Nylon 6.

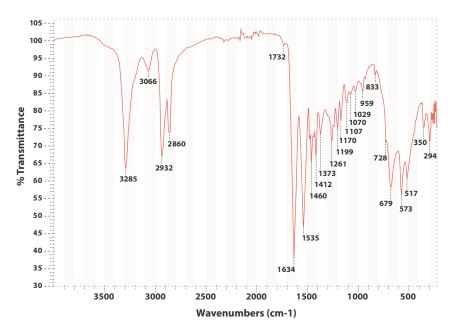


Ilustración 13.Espectro infrarrojo del polietilenglicoltereftalato.

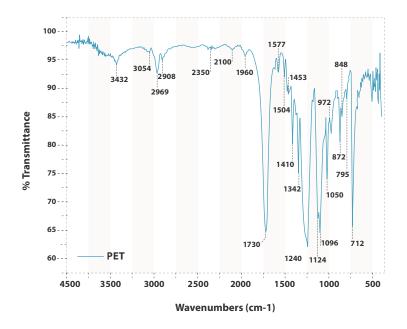
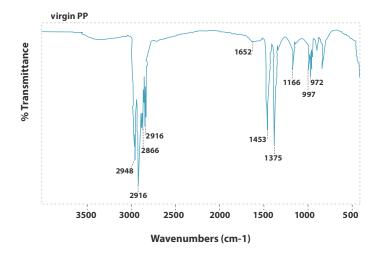


Ilustración 14.Espectro infrarrojo del polipropileno.



En la llustración 13 se puede ver el espectro infrarrojo del polietilenterftalato.

En este se puede notar la absorción a 1730 correspondiente al estiramiento del grupo C=O del grupo éster y las absorciones a 2350, 2100 y 1960 correspondientes a los sobretonos de las flexiones C-H aromáticos de un anillo para disustituido. Las absorciones a 3054, 2969, 2908 y 141o, correspondientes a los estiramientos asimétricos y simétricos de los hidrógenos del grupo metileno y de los grupos hidrógeno de los anillos aromáticos y las flexiones de los grupos metileno, algunas similitudes con las correspondientes del polietileno con diferencias que permiten diferenciar el material del nylon.

En el espectro infrarrojo del polipropileno (Ilustración 14)se observan absorciones a 2948 y 2916, características de los estiramientos asimétrico y simétrico de los grupos metilo, las absorciones a 2866 y 2837, correspondientes a los estiramientos asimétricos y simétricos de los hidrógenos del grupo metileno. Las absorciones a 1453 y 1375 corresponden a flexiones de los grupos metilo y metileno, ambos presentes en el polipropileno. La presencia de las absorciones de grupos metilo permite diferenciar el polipropileno del polietileno.

LA GRANULOMETRÍA

Es la distribución de tamaños de las partículas de una muestra. Esta se determina midiendo la cantidad de material que atraviesa, sucesivamente, varios tamices con aperturas de tamaño decreciente. Los tamices de malla de alambre son aberturas cuadradas con orificios de tamaño conocido. Para muestras finas se suelen usar de 6 a 8 tamices estándar. Para arenas van desde la malla 200 (con la apertura menor) hasta la de ¼ de pulgada, con la apertura mayor.

El material retenido en cada malla es pesado y se construye una tabla en donde se tiene el tamaño de orificio (de mayor a menor), la cantidad retenida por esa malla, la cantidad relativa retenida, en %, la cantidad retenida acumulada, en %, y la cantidad relativa que pasa por esa maya, en %. Finalmente se grafica la cantidad que pasa cada malla vs el tamaño de orificio, en escala logarítmica, y eso nos da una representación gráfica de la distribución de partículas en la muestra.

LA GRANULOMETRÍA DE LA ARENA Y LA PLAYA

La arena es una fracción de fragmentos de roca, conchas y otros productos minerales con una distribución de partículas tal que se acumulan en las playas. Las partículas pequeñas son más fácilmente arrastradas por las corrientes que las partículas más gruesas y eso hace que en una playa exista toda una distribución de tamaños de partículas que varía de sitio a sitio debido a las olas, el viento y las corrientes. Para poder tener en la zona de rebalaje de una playa una gran proporción de granos pequeños se requiere que la playa sea relativamente llana en esa zona. Bajo estas condiciones las partículas pequeñas pueden sedimentarse y permanecer en la playa. Cuando tenemos una playa con una gran pendiente en la zona de rebalaje, el tamaño de las partículas tenderá a ser relativamente mayor debido a la mayor facilidad de sedimentación que tienen los granos grandes pues los pequeños tenderán a ser arrastrados por la corriente que pasa sobre ella con velocidad. De forma similar, si la zona de berma de una playa está expuesta a gran cantidad de viento, este arrastrará las partículas pequeñas con mucha más fuerza, llevándolas a la zona posterior a la berma de la playa. Es por eso que cada zona tendrá una granulometría muy diferente a las otras y es característico de cada playa. Habiendo dicho todo esto, podemos tener ciertas predicciones de la granulometría típica de una playa con examinar su geomorfología.

Esto es importante pues en la medida que tratemos de separar micro plásticos de una arena con una granulometría mucho más fina tendremos problemas. Al requerir la sedimentación de los granos de arena para poder separarlos de los micro plásticos se requerirá de mucho más tiempo para las playas con geomorfologías relativamente planas o cuando la muestra provenga de la post-berma.

EL PROCESO DE MOLIENDA

La molienda es el proceso mediante el cual un material es fracturado en piezas más pequeñas. La molienda es la última etapa en el proceso de trituración; en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto (fuerza) y la abrasión. En un proceso de molienda, existen cuerpos de trituración y de molienda. El proceso de molienda genera energía calórica por la fricción de los cuerpos. ya sea en seco o en suspensión en agua. La relación de dureza de los materiales en fricción, determinará cuál se fracturará y molerá primero. La dureza es la resistencia que presenta un material a alteraciones físicas como la abrasión.

En el proceso de molienda, también incide el tamaño de las partículas, especialmente del material más duro, que funciona como "agente de molienda".

La arena de playa es un agente de molienda idóneo, ya que está constituido por granos en escala microscópicos, y de origen mineral. De esta forma, la playa se convierte en un gigantesco molino, que por acción del oleaje fricciona los objetos con dureza menor, como es el caso de los plásticos.

La granulometría del agente de molienda, influye en el tamaño final de las partículas que se están moliendo, así entre más pequeña sea la partícula del agente de molienda, más pequeña será la partícula del material que se está moliendo.

La arena en la playa, es una fracción de fragmentos de roca, conchas y otros productos minerales con una distribución de partículas tal que se acumulan van acumulando en la zona de confluencia del mar y la tierra. Las partículas pequeñas son más fácilmente arrastradas por las corrientes que las partículas más gruesas y eso hace que en una playa exista toda una distribución de tamaños de partículas que varía de sitio a sitio debido a las olas, el viento y las corrientes, y esto implica también que los procesos de molienda se dan de diferente forma dependiendo de la zona de la playa en que nos encontremos.

Para poder tener en la zona de rebalaje de una playa una gran proporción de granos pequeños, se requiere que la playa sea relativamente llana en esa zona. Bajo estas condiciones las partículas pequeñas pueden sedimentarse y permanecer en la playa. Cuando tenemos una playa con una gran pendiente en la zona de rebalaje, el tamaño de las partículas tenderá a ser relativamente mayor debido a la mayor facilidad de sedimentación que tienen los granos grandes pues los pequeños tenderán a ser arrastrados por la corriente que pasa sobre ella con velocidad. De forma similar, si la zona de berma de una playa está expuesta a gran cantidad de viento, este arrastrará las partículas pequeñas con mucha más fuerza, llevándolas a la zona posterior a la berma de la playa. Es por eso que cada zona tendrá una granulometría muy diferente a las otras y es característico de cada playa. Habiendo dicho todo esto, podemos tener ciertas predicciones de la granulometría típica de una playa con examinar su geomorfología.

Esto es importante pues en la medida que tratemos de separar micro plásticos de una arena con una granulometría mucho más fina tendremos mayor dificultad, y será una limitante del método. Al requerir la sedimentación de los granos de arena para poder separarlos de los micro plásticos se requerirá de mucho más tiempo para las playas con geomorfologías relativamente planas o cuando la muestra provenga de la post-berma.

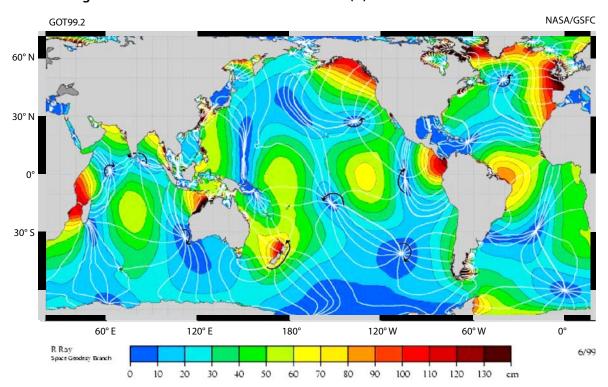
LAS MAREAS, SU FRECUENCIA, MAGNITUD Y LAS MAREAS DE PRIMAVERA

Para comprender mejor la programación de la toma de muestras y la dinámica de los plásticos en las playas es importante conocer cómo se comportan las mareas en Costa Rica y el mundo. Las mareas son oscilaciones del nivel del mar que tienen periodicidades varias debido a la influencia de cuerpos celeste como la luna, el sol y júpiter, y corrientes marinas en el nivel del mar. Veremos diferentes aspectos de estas a continuación.

LAS MAREAS

Lo que conocemos como mareas son variaciones del nivel del mar que ocurren a lo largo del día. En algunos lugares hay dos mareas altas (pleamares) y dos mareas bajas (bajamar) al día. En otros se tiene solo una alta y otra baja al día. Esto se conoce como mareas semidiurnas o diurnas, respectivamente. En la llustración 15 se puede ver que la magnitud de diferencia entre la marea alta y la baja varía enormemente a lo largo del mundo y que los valores máximos de diferencia se dan en algunos lugares del mundo como lo son la zona Costa Rica-Panamá-Colombia, la Costa Pacífica de Canadá-Alaska, la costa atlántica de Francia-Irlanda-España, la costa este de África, la costa Oeste de Nueva Zelanda y algunas otras zonas relativamente pequeñas. Es interesante notar como la experiencia tan común para los costarricenses de ver mareas altas y bajas es en realidad un fenómeno bastante aislado.

Ilustración 15. La magnitud relativa de las mareas en el mundo.(14)

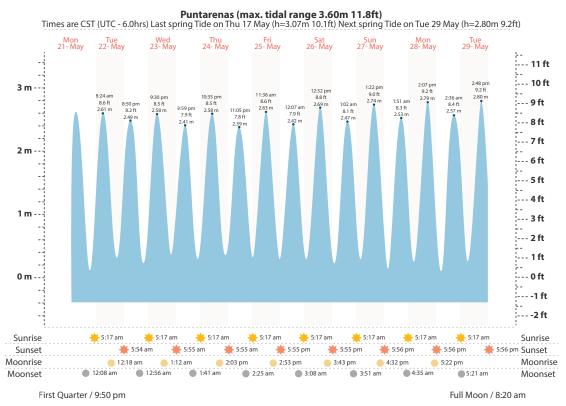


También se tienen zonas del océano en donde las líneas de cambio de marea se juntan que son zonas en donde el nivel de la mar no varía durante el día de forma apreciable. Estos lugares se encuentran en los centroides de los océanos como en el pacífico sur, el pacífico norte, el atlántico norte, el atlántico sur y algunas otras regiones.

LAS MAREAS Y LA HORA DEL DÍA: CUÁNDO ES MAREA ALTA Y CUÁNDO MAREA BAJA

Debido a que la posición relativa de la luna, el sol y júpiter, respecto a un lugar específico de la tierra, cambian constantemente, el momento de la pleamar y la bajamar cambian constantemente. Un ejemplo de esos cambios se puede apreciar en la llustración 16. En ella se puede ver como la pleamar cambia día a día. El tiempo entre pleamares es de aproximadamente 12 horas y 30 minutos, haciendo difícil recordar exactamente el momento de la pleamar, lo que hace necesario una herramienta para predecir la pleamar y la bajamar. En la llustración 17 podemos ver la hora de la pleamar y la bajamar para Puntarenas durante algunos días de mayo y junio del 2018.

Ilustración 16. Ejemplo de los tiempos de pleamar y bajamar para Puntarenas (15)



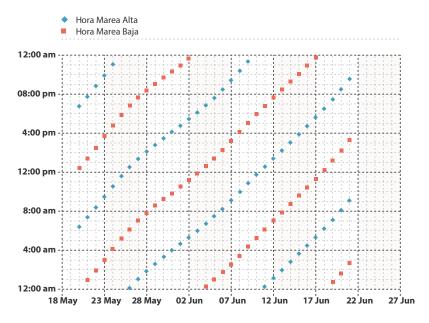
LA MAGNITUD DE LAS MAREAS Y LOS CICLOS NATURALES

Las mareas pueden tener magnitudes diferentes debido a que el movimiento del agua está regido por la atracción de gravitacional que ejerce el sol y la luna. Si ambos astros se encuentran alineados y del mismo lado del planeta las mareas son de mayor magnitud. Este tipo de mareas se llaman mareas de primavera, aunque no corresponda esa denominación con la estación pues se da dos veces al mes. Si ambos astros se encuentran alineados, sea del mismo lado del planeta o en lados opuestos, las mareas serán de las más intensas. Si la luna, la tierra y el sol forman un ángulo de 90° las mareas serán de menor magnitud a otras. Si una marea de primavera coincide con el perihelio (punto más cercano de la tierra al sol y que ocurre el 2 o 3 de enero de cada año) y con el momento de la órbita más cercana de la luna a la tierra se producen mareas excepcionalmente altas. También si dos de estas

condiciones se dan. La coincidencia entre la fase de la luna y la magnitud de la marea puede ver en la llustración 18 en donde la proporción de la cara de la luna iluminada se grafica para cada día del 2018 junto a la magnitud relativa de la marea para ese día. Todos los datos para Puntarenas. También hay que considerar que el plano de rotación de la luna alrededor del sol es diferente del plano de órbita de la tierra por lo que aun en luna llena o nueva los tres cuerpos pueden no estar alineados, generando mareas más intensas en el hemisferio sur o norte en esas situaciones.

Es por esta serie de razones que no existe una solución analítica de la intensidad y el momento exacto de las mareas para un lugar dado. Para tener una herramienta predictiva de la magnitud de las mareas y su momento exacto, para un lugar dato, se utilizan métodos numéricos con gran cantidad de datos experimentales obtenidos a partir de muchos años de observación.

Ilustración 17. Hora de la pleamar y la bajamar para diferentes días del 2018 en Puntarenas.(16)



La herramienta más aceptada, dada la naturaleza periódica de todos los movimientos traslacionales y rotacionales de los cuerpos celestes involucrados, es utilizar el nivel del mar como el resultado de varias oscilaciones superpuestas. Todas ellas dominadas por oscilaciones harmónicas, cada una con una frecuencia dada y una fase dada respecto a las otras. Así la duración del ciclo lunar, la duración del año, la órbita de júpiter y de otros cuerpos celestes pueden ser considerados para generar una gran predictibilidad matemática de la magnitud de las mareas. Para esto se requieren los datos históricos de mareas para usarlas en el ajuste matemático. El método más utilizado es el de e mínimos cuadrados usando el algoritmo de Foreman (): Afortunadamente tenemos a disposición sitios web que nos dan las predicciones de las mareas, sus horas y sus intensidades relativas para Puntarenas. Datos que pueden extrapolarse para el Pacífico central costarricense.

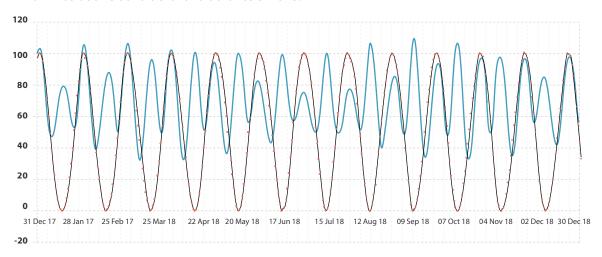
Ecuación 1.

Modelo matemático de Foreman para la predicción de las mareas.

$$\eta(\tau) = a_0 + \sum_{n=1}^{k} a_n \cos(\omega_n t + \alpha_n)$$

Ilustración 18.

Diferencia relativa de nivel del agua entre pleamar y bajamar en Puntarenas (línea gruesa) y la luminosidad relativa de la luna durante el 2018.



MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describen los pasos y razonamientos utilizados para llegar al procedimiento validado.

ESCOGENCIA DE CLORURO DE CALCIO PARA LA FLOTACIÓN

El cloruro de calcio fue escogido para realizar la flotación por varias razones. Es una sal muy común que no requiere de un permiso especial para su compra. De hecho, es un ingrediente en procesos de manufactura de alimentos. Es sumamente económico y una vez diluido es inocuo. No tiene un efecto sobre el ambiente que genere peligros y permite generar disoluciones de altas densidades que permiten la separación eficiente de la gran mayoría de plásticos.

Tienen la desventaja de que es altamente corrosivo por lo que puede provocar el deterioro rápido de los tamices utilizados para separar los plásticos del líquido supernadante que se usa para la flotación.

Se elaboraron marcos de madera con tamices de acero inoxidable de diferentes tamaños para verificar su funcionalidad y su durabilidad. Esto debido al alto costo que tienen los marcos de tamices comerciales y su potencial oxidación ante la arena, el agua de mar y las disoluciones de cloruro de sodio y cloruro de calcio. Los marcos preparados eran de 26 cm x 22 cm. Se confeccionó un marco cuadrado de madera con una apertura de 40 cm de lado para definir el área a muestrear de arena.

LA MUESTRA

La muestra de arena tomada debe de ser significativa del lugar y darnos la información que queremos recabar en el proceso. Esta es una tarea que requiere de análisis pues las diferentes zonas de la playa, la de "beachface" y la posterior a la berma, tendrán cantidades diferentes de microplásticos y cada una puede tener un interés en particular. La zona posterior a la berma es de interés pues dependiendo de la playa puede ser muy transitada y sus partículas de plástico muy notorias. Adicionalmente, la zona de "beachface", teniendo un proceso de degradación constante puede ser una zona de evaluación de los esfuerzos por disminuir la contaminación marina de plásticos y la zona posterior a la berma un indicativo de la percepción de contaminación de la misma playa por turistas. Esta última requiere una redefinición del tamaño de partícula de interés pues debido a su débil proceso de degradación mecánica de plásticos las partículas esperadas serían de mayor tamaño. Siendo el alcance de este estudio la evolución de microplásticos en la arena de playas escogemos la zona de "beachface", entre el punto de marea alta y marea baja, como el sitio de muestreo. El muestreo debe de realizarse en los lugares de interés y estos serán los de mayor posibilidad de estar altamente contaminados por plásticos.

PLAYAS PERCIBIDAS COMO LAS MÁS CONTAMINADAS

Las playas que podrían tener la mayor contaminación se encuentran en las cercanías de la desembocadura del río Tárcoles hacia el sur. Estas son las de Guacalillo, Jacó, Herradura y Tárcoles. Estas se muestran en mapa de la Ilustración 19. Es también conocida la contaminación de la playa de la ciudad de Puntarenas también. La última puede provenir del Tárcoles como de la misma ciudad y su actividad turística. Este factor no está dentro de los alcances de este estudio.

PLAYAS VISITADAS

Se realizaron varias visitas a Jacó, Guacalillo y Puntarenas en varias fechas. Estas se muestran en la Tabla 3.

Ilustración 21.Mapa de la zona de la desembocadura del río Tárcoles, Puntarenas, Costa Rica.(d)



MOMENTO DE TOMA DE MUESTRA

Para poder tomar una muestra en la zona de rebalaje, es necesario conocer la hora de la marea alta y la marea baja. Para esto se puede utilizar el sitio web https://www.tide-forecast.com/ que redirige a las mareas de Puntarenas y Chacarita, entre otros, que son representativas del pacífico Costarricense. Es notorio que la magnitud de cada marea es diferente y tiene importancia. Hay mareas más altas y más bajas. Solamente un par de veces al año se tienen mareas extraordinariamente altas y bajas y esas fechas son importantes para los plásticos que se puedan encontrar en la zona post-berma. Para tener una buena noción del punto de muestreo se debe estar en la playa en el momento de la marea baja.

TOMA DE MUESTRA

Se ubicó el punto medio de la zona de rebalaje y se dibujó en la arena un cuadrado de 40 cm x 40 cm. Se tomó una muestra de 0,5 cm- 1 cm de arena de este cuadrado y se introdujo en un recipiente para ser extraído posteriormente.

CONSERVACIÓN DE LA MUESTRA

Las muestras se introdujeron en recipientes plásticos y fueron adecuadamente etiquetadas con fecha y lugar de toma de muestra. Fueron almacenados a temperatura ambiente hasta ser llevadas al laboratorio.

SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS POR FLOTACIÓN

Las muestras de arena fueron mezcladas con la disolución de cloruro de calcio saturada. Se permitió su sedimentación y fueron decantadas por un tamiz 100. Los fragmentos así separados fueron transferidos a un recipiente de vidrio conteniendo una solución de alcohol acuoso y se separaron los fragmentos de maderas que flotaban. Los fragmentos sedimentados se obtuvieron por aparte filtrando por un tamiz 100 con la ayuda de agua y se procedió a lavar los contenidos del tamiz con agua potable. Fueron transferidos con la ayuda de agua a un recipiente con agua y separados por flotación. Los fragmentos que flotaban se separaron por decantación sobre un tamiz 100 y se lavaron con etanol y se dejaron secar al aire por 24 horas.

FRACCIONES DE PLÁSTICO Y SU CONTENIDO CARACTERÍSTICO

Los plásticos presentes en las diferentes fracciones de densidad definidas en la deben corresponder con las encontradas en las playas debido a que la densidad de cada material no debería de afectarse sustancialmente por efecto de la exposición al ambiente. Para verificar dicha asignación se verificará la identidad de fragmentos hallados en estas fracciones mediante espectroscopia infrarroja.

CUANTIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS DE CADA FRACCIÓN

La cuantificación de la cantidad de plásticos utilizando cantidad de partículas tiene una gran desventaja. Es altamente subjetiva y se presta para generar números enormes con propósitos propagandísticos. Una medida más coherente de la cantidad de plásticos es los gramos por metro cuadrado. Este valor se obtiene al dividir la cantidad de plástico obtenido en un área dada por el valor de esa área.

TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Las aguas residuales de lavado que contienen cloruro de calcio y cloruro de sodio tienen concentraciones de sales superiores a lo recomendado para plantas de tratamiento. Es por eso que es preferible su recuperación. Una pre dilución sería necesaria antes de que soluciones de sales lleguen a plantas de tratamiento o ríos. Es por eso que el desagüe de la zona de sales debe de combinarse con otras aguas servidas en un volumen de pre dilución para poder luego pasar a una planta de tratamiento.

TRATAMIENTO DE SOLUCIONES DE CLORURO DE CALCIO USADAS

Las disoluciones de cloruro de calcio utilizadas para obtener flotación de plásticos se pueden recuperar al permitir que los limos y arenas finas que contienen se sedimenten. Luego de decantar las disoluciones de los residuos se puede recuperar la densidad deseada volviendo a saturar con cloruro de calcio sólido.

RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

PLAYAS VISITADAS

Las playas visitadas y las fechas de visita están en la Tabla 3. Se tomaron las muestras ahí mencionadas.

Tabla 3. Playas visitadas y muestras tomadas

Fecha	Playa	Muestras tomadas
5 de mayo, 2018	Jacó	Tres muestras a mitad de la zona de rebalaje en el centro de la playa de Jacó. Durante la marea baja. Dos horas luego de la marea baja
5 de mayo, 2018	Puntarenas	Una muestra en arena seca en la zona post berma. Durante Marea creciente. Tres horas y media luego de la marea baja.
11 de mayo, 2018	Jacó	Dos muestras a mitad de la zona de rebalaje en el centro de la playa de Jacó. Cuatro horas luego de la marea alta.
11 de mayo, 2018	Guacalillo	Dos muestras a mitad de la zona de rebalaje en el centro de la playa de Guacalillo. Durante marea baja.
13 de mayo, 2018	Guacalillo	Una muestra en la cercanía del peñón

PRIMERA VISITA: JACÓ Y PUNTARENAS

Se realizó un ensayo de extracción de plásticos en las playas de Jacó y Puntarenas el 5 de mayo del 2018. Este ensayo se realizó llevando todos los implementos de extracción al sitio. Se vertió cloruro de calcio saturado a la muestra de arena húmeda y se decantó el supernadante sobre una malla 200. De esta experiencia surgieron varias observaciones que se detallan a continuación.

Al realizar las extracciones en la playa se obtuvieron varias conclusiones valiosas. El extraer la arena de la playa con la disolución de cloruro de calcio saturada produce una disolución recuperada con limos y arenas pues no se tiene suficiente tiempo para una buena sedimentación. Se observó que la arena caliente calienta la disolución de cloruro de calcio disminuyendo entonces su densidad. Esto podría causar que el pvc no flote adecuadamente en la solución caliente. Fue necesario reutilizar la solución saturada de cloruro de calcio pues es sumamente difícil llevar disolución suficiente para tratar varias muestras, por el volumen requerido y su alta densidad. Al hacer esto se encontró que la

densidad de la disolución cambió, de un valor inicial de 1,454 a 1,364^e luego de haber analizado tres muestras de arena húmeda. La disolución de cloruro de calcio que se ha usado puede reutilizarse luego de saturar de nuevo con cloruro de calcio. Es necesario que la disolución de cloruro de calcio sea pre filtrada por malla 200, y que haya podido dar una sedimentación adecuada de limos (al menos 24 horas) antes de usarse de nuevo.

Se encontró también que la arena presente en la zona post berma en Puntarenas tiene una gran cantidad de arena fina que dificulta la separación de un supernadante claro y los plásticos, haciendo necesaria una nueva y posterior separación. Adicionalmente, es difícil la manipulación de recipientes con disoluciones y suspensiones, tamices y otros insumos en la playa pues todo lo requerido debe de ser transportado al sitio. Todos los implementos y recipientes se contaminan con arena lo que hace que la muestra extraída este altamente contaminada con arena y requiere de un posterior proceso de separación, haciendo del proceso en playa uno ineficiente e inefectivo. Al tratar de retornar con los extractos de plásticos encontramos que es difícil que la muestra no se deteriore por pérdidas durante el transporte. Por estas razones se concluye que es preferible tomar muestras de arena y analizarlas posteriormente en un laboratorio.

Para asegurar la operación del laboratorio es necesario tomar algunas precauciones. Todas las pilas de lavado deberían de tener gran espacio y un leve desnivel para permitir la presencia de la arena. Se requiere tener una gran trampa de líquidos para permitir que la arena y otros finos puedan sedimentarse y no obstruyan las tuberías de salida de las aguas de lavado. Las áreas de lavado deberían de tener a disposición indumentaria exclusiva de éstas áreas para evitar que se contamine el resto del laboratorio. Esto incluye trampas de agua, cortinas plásticas y zona de cambio de ropa entre áreas. El área sucia debe de tener un desnivel adecuado para lavar el piso luego de cada operación. El desagüe de este piso debe tener una buena trampa de arenas.

La corrosión y contaminación de soluciones es un tema muy delicado para los análisis a realizar. El llevar una arena al laboratorio implica la necesidad de una política de manejo de arenas en el sitio. Esto incluye el lavado exhaustivo de los materiales llevados a la playa para evitar la corrosión de los artículos metálicos del laboratorio. El cloruro de calcio y el cloruro de sodio acuosos son altamente corrosivos y pueden causar daños a los vehículos. Es por esto que recomendamos que no se transporten estas disoluciones y se manejen únicamente en un espacio llamado "sucio" o "de sales" en donde se minimizaría la presencia de materiales metálicos y que estaría separado de otros espacios utilizando medidas de precaución para evitar el deterioro de los equipos electrónicos, altamente onerosos.

Para garantizar un proceso reproducible es necesario tomar precauciones. Si la arena se lava con agua sobre malla 100 en el espacio sucio y luego se seca completamente se elimina la posibilidad de contaminar el cloruro de calcio con finos y de diluir la solución de flotación. La flotación en cloruro de calcio y cloruro de sodio acuosos deberían de realizarse en el cuarto de sales o cuarto sucio. La flotación inicial de los plásticos puede realizarse en un pichel de vidrio pues al tener pico puede verter libremente la solución supernadante. Estos implementos son muy económicos y permiten tener suficientes para que la sedimentación de las arenas y limos finos se den completamente en las muestras.

Para facilitar la separación de los plásticos y la arena se debe escoger bien el tamiz a utilizar. Es preferible el uso de una malla 100 pues las mallas 200 son demasiado finas para el trabajo pues algunos limos se retienen. Especialmente cuando se procesan arenas que

se encuentran en la parte alta de la playa. La malla 200 tiene apertura de 0,078 mm que es levemente menor a los deseado de 0,1 mm y podría ser sustituida por una malla 100 que tiene una apertura de 0,014 mm. Esta dejaría pasar algunos limos y arenas muy finas y considerando la flotación de partículas muy finas no se pierde una cantidad de muestra importante. Adicionalmente la corrosión es mayor en la malla más fina y la malla más fina es más delicada y se rompe con facilidad.

Referente a la playa de Puntarenas algunos elementos fueron muy notorios. Se puede separar la playa en tres regiones claramente diferentes. La zona de rebalaje, en la que no se observan muchos plásticos y que tiene un tamaño variable dependiendo de la marea del día. Esta se puede observar en la llustración 20. La zona de rebalaje termina en una cúspide, llamada berma. La berma es visible en la Ilustración 21. Cercano a la berma, del lado del rebalaje, se pueden observar diferentes líneas de residuos de madera con plásticos que claramente fueron dejados por una marea especialmente alta de pasado reciente. La Ilustración 21 fue tomada el 5 de mayo, fecha en que la marea no fue especialmente alta y no había sido muy alta por varios días. Por esa razón la berma está ubicada luego de una zona seca de la playa. Para que el mar vuelva a llegar a esta zona se requiere de una marea de primavera. Varias imágenes de este fenómeno se pueden apreciar en la Ilustración 22. Más atrás de la berma esta zona una que llamamos post-berma. Esta zona está llena de plásticos de diversos colores que son claramente visibles junto a una gran cantidad de fragmentos de madera. Los residuos de madera y plástico de esta zona han de haber sido depositados por una marea excepcionalmente alta, que ha de haber movido residuos de las zonas accesibles a mareas más bajas y las ha dejado desperdigadas por toda el área. Tarea que asiste el viento. Estos se pueden apreciar en la .llustración 23.



Ilustración 20: Zona de rebalaje, Playa de Puntarenas



Ilustración 21: La berma es visible al lado izquierdo de la imagen, en la zona seca de la playa, Playa de Puntarenas.

⁽f) Sería recomendable tener una sala de lavado separada del resto del edificio para evitar que la sal y soluciones salinas corroan balanzas y mesas de trabajo (acero).

⁽⁹⁾ Las partículas muy pequeñas tenderán a suspenderse en el agua por lo que su presencia en la muestra es poco probable.



Ilustración 22: Líneas de residuos plásticos con trozos de madera dejados por una ola en una marea alta previa.



Ilustración 23: Zona post-berma con gran cantidad de residuos de madera y de plásticos claramente visibles.

La tercera zona es una adonde se observan algunos residuos de madera, muy poco plástico y algunos otros objetos y que en el momento de la visita tenía una leve vegetación. Esta zona se puede observar en la llustración 24.



Ilustración 24: Zona de poca contaminación, Playa de Puntarenas.

SEGUNDA VISITA: JACÓ Y GUACALILLO

Se realizó un ensayo de toma de muestra de arena en las playas de Jacó y Guacalillo el 11 de mayo del 2018. Este ensayo se realizó llevando solamente los implementos para la toma de muestra al sitio. Se dibujó un cuadrado de 40x40 cm y se tomó aproximadamente un centímetro de la capa superior de arena de la playa. Se guardaron para posterior análisis. De esta experiencia surgieron varias observaciones que se detallan a continuación.

El 11 de mayo de 2018 tenía una La marea alta las 11:45 pm por lo que se esperó a las 4:00 pm para accesar la playa de Jacó. Las muestras tomadas en esa ocasión tenían gran cantidad de agua de mar pues debido a la poca pendiente de la playa de Jacó y habiendo estado la zona recientemente inundada, la arena estaba saturada de agua. Esto no sucedió en la playa de Guacalillo, adonde se tomó a la muestra a las 5:20 pm siendo la marea baja a las 5:57 pm. La playa de Guacalillo tiene una pendiente muy superior a la de Jacó por lo que la arena estaba casi completamente seca. Además, debido a la segregación de partículas de arena, se observó una berma de arena muy fina y una zona de rebalaje con arena muy gruesa.

En la playa de Guacalillo no se encontró la gran cantidad de plásticos que se ha reportado. Se encontraron, en la zona post berma, gran cantidad de plásticos muy enteros que eran típicamente polietileno, poli estireno no expandido, polipropileno y espuma de poli estireno (¿aislante de refrigeradoras?). Estas se pueden apreciar en la Ilustración 25. Un lugareño comentó que hay una organización que ahora pasa limpiando la playa y por eso no se observaba gran cantidad de plásticos enteros. Se buscó una zona con mayor evidencia visual de plásticos, pero no se pudo encontrar.



Ilustración 25: Plásticos evidentes en la zona post-berma de playa Guacalillo



Ilustración 26: Plásticos observados en la berma de Guacalillo.

La geomorfología de Guacalillo es muy similar a la de Puntarenas. La zona de rebalaje es relativamente pequeña con gran inclinación. En esta zona no se observaron partículas de plástico. En la berma se pudieron apreciar cierta cantidad de plásticos, como se aprecian en la Ilustración 26.

Una de las conclusiones más importantes de esta visita es que la hora de la toma de muestra es fundamental. Una muestra tomada durante el vaciado del mar va a contener mucha más agua de mar que una tomada durante el llenado. Recomendamos tomar la muestra durante el llenado. Su transporte es mucho más fácil y además la contaminación que esta muestra le dará a la solución de cloruro de calcio es mucho menor.

TERCERA VISITA: GUACALILLO Y JACÓ

Durante la filmación de un documental referente a los plásticos en los océanos en el que participa Cody Simpson, vocero de las naciones unidas para el océano, se realizó una toma de muestra de plásticos en el punto medio de la zona de rebalaje en la Playa de Guacalillo. Durante ese día se dio una jornada de limpieza de la playa con la participación de gran cantidad de voluntarios. Lo observado en ese momento fue la baja cantidad relativa de plásticos presentes en la playa en ese momento. Conversando con los representantes de la Asociación costarricense de surf nos enteramos de los esfuerzos constantes para mantener esa playa libre de plásticos y como voluntarios están constantemente llegando a limpiar esta playa. Adicional a esto, nos comentaban como la verdadera contaminación en esa playa llega cuando se tienen las tormentas de septiembre y octubre en las que los plásticos atrapados a lo largo de los ríos son finalmente liberados y llevados al mar. Que luego de una gran tormenta se ve claramente la contaminación. De esta experiencia tomamos algunos aprendizajes que se detallan a continuación:

• Como las muestras tomadas durante este estudio fueron durante el mes de abril y mayo, es esperable que la cantidad de plásticos presentes sea considerablemente menor a lo que se podría encontrar en los meses de octubre y noviembre, cuando los fragmentos de macro plásticos han tenido una degradación que los lleva a ser partículas de micro plásticos en la arena, pero todavía no se han desgastado a ser partículas de plástico tan pequeñas que no se sedimentan.

- Que el efecto que tienen los voluntarios para la limpieza de una playa es significativo
- Se confirmó la presencia en la zona post-berma de plásticos del tipo polietileno y polipropileno por inspección visual de macro plásticos
- Se encontró que la sedimentación de la arena de Guacalillo es sumamente rápida a diferencia de la de Jacó, siendo la de Puntarenas dependiente de la muestra tomada. De esto se concluye que la facilidad de la toma de muestra depende de la granulometría de la arena de la playa en cuestión y que esta depende de la geomorfología específica de la playa, habiendo una relación entre la facilidad de sedimentación con la pendiente de la playa en cuestión.

SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS POR SU DENSIDAD RELATIVA

SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS DE LA ZONA POST-BERMA DE PUNTARENAS

El 5 de mayo se suspendió una muestra de arena, de 40x40 cm y unos 3 cm de profundidad, de la zona post-berma de Puntarenas, en una solución saturada de cloruro de calcio. Al observar que mucha fina y otros finos quedaron atrapados en la malla 200 se procedió a pasar el supernadante por la malla 40. Se observó una gran cantidad de trozos de madera que flotaban junto con piezas de plástico claramente visibles. Los fragmentos obtenidos en esa oportunidad fueron luego suspendidos en una solución de etanol/agua con densidad de 0.901 g*ml-1. Se observó una flotación de la mayoría de los fragmentos de madera y algunos pocos de plásticos. Esta mezcla se separó luego de pasar la solución supernadante por un tamiz 40 haciendo varios lavados. Lo retenido en la malla puede verse en la llustración 27 junto con los plásticos manualmente seleccionados del tamiz en un vial. Estos fueron pesados y se determinará su identidad mediante espectroscopia infrarroja.

Los residuos que sedimentaron se suspendieron posteriormente en agua pura y se observó la flotación de la mayoría de los plásticos (ver Ilustración 28). En este paso se vio como los fragmentos de madera remanente permanecían en el fondo. Se separaron estos fragmentos por decantación y filtración por la malla 40 y se guardaron para pesarlos e identificarlos posteriormente mediante espectroscopia infrarroja (ver Ilustración 29). Se observó la flotación de micropartículas que no fueron retenidas por el tamiz 40 y que eran claramente plásticos transparentes. Estos fragmentos son claramente visibles en la Ilustración 30. Esto hace necesario una muestra posterior para el análisis de fragmentos de microplásticos no usando malla 40 sino una malla 100 o 200. Los fragmentos de plásticos obtenidos en este paso se lavaron con etanol y se secaron a 75°C.

Se observó que las mallas 200 ya presentaban clara oxidación con apertura de orificios. Esto hace de las mallas inservibles para retener los fragmentos deseados. Es por esto que se utilizó la malla 40 para retener los fragmentos de plásticos. Este hallazgo nos hace pensar en la conveniencia de usar una malla 100 en vez de la 200. La malla 100 tendría una mayor resistencia a la oxidación y sería mucho más resistente mecánicamente.

Densidad de solución saturada de cloruro de sodio usada fue de 1,195 g*cm-3.

CUANTIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS DE CADA FRACCIÓN

La cuantificación de la cantidad de plásticos encontrados no fue posible con la instrumentación disponible durante este estudio, con una excepción: Puntarenas zona

post-berma. Esto debido a las pequeñas cantidades de plásticos encontrados. La diferencia de este resultado con resultados previos tiene varias explicaciones. Primeramente, la escogencia del sitio exacto del muestreo es crucial. Se observaron líneas de plásticos en la zona de rebalaje que correspondían a las olas más altas de la marea alta previa. Esto genera un sesgo en la toma de muestra pues no es lo mismo tomar una muestra en donde se pueden apreciar estas líneas que en otro lugar de la zona de rebalaje. También se puede tomar una muestra en una zona que sea en realidad de berma o post-berma en donde lo que habría serían plásticos que no están sometidos a procesos de degradación constante y por lo tanto su cantidad sería mayor.

La zona de rebalaje es además el lugar adonde se esperaría que hubiera menor cantidad de plásticos por dos razones: Los plásticos que ahí quedarían son menos densos que el agua de mar y por lo tanto la mayoría de ese tipo de plástico no habría llegado a la playa y estaría en el fondo del mar en zonas fuera de la playa. Es la zona de degradación mecánica de los plásticos y su remanencia es limitada pues al llegar a tamaños muy pequeños, por el embate constante del agua y la arena, flotarían eventualmente los fragmentos muy pequeños y se irían con el agua de las olas.

La cantidad de plásticos con densidad relativa menor a 1,00 encontradas en la zona postberma era importante y estaba constituida por microplásticos de tamaños relativamente grandes. La cantidad encontrada en 40 cm x 40 cm fue de 6.6 gramos lo que da una cantidad de plásticos de 41 gramos por metro cuadrado. Esta cantidad es bastante grande y es posible que se deba a un efecto acumulador a lo largo de años, de los plásticos que llegan a esta zona durante las mareas extraordinariamente altas que se dan un par de veces al año.

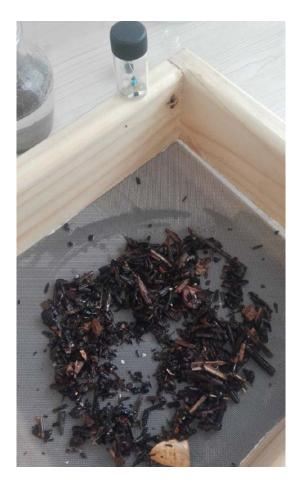


Ilustración 27: Muestra obtenidos por flotación en etanol acuoso de la muestra obtenida en Puntarenas, en la zona post-berma, el 5 de mayo del 2018.

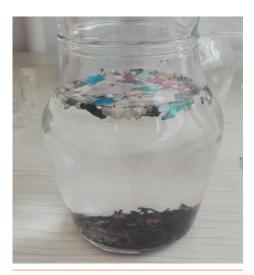


Ilustración 28: Flotación en agua de fracción densidad mayor a 0.9, muestra: Puntarenas post-berma



Ilustración 29: Fragmentos de plástico obtenidos por flotación en agua, playa Puntarenas., post-berma



Ilustración 30: Fragmentos finos obtenidos por flotación en agua de la muestra de Puntarenas de post-berma

SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS DE LA PLAYA JACÓ DEL 5 DE MAYO

El 5 de mayo se tomaron muestras de arena de 40x40 cm y 1 cm de profundidad de la playa de Jacó en la zona central. Estas estuvieron separadas ca. 50 metros entre sí. Cada muestra fue suspendida en cloruro de calcio acuoso saturado y luego de permitir la sedimentación de la arena se pasó la solución supernatante por una malla 200. Se observó que estas muestras contenían mucha arena como contaminante debido a la granulometría fina de esta playa. Además, no presentaban una gran cantidad de plásticos. Por esta razón fueron combinados en una sola muestra al transferir los residuos secos a una bandeja mediante una brocha fina. Luego de esto fueron suspendidos en solución saturada de cloruro de calcio de nuevo y se observó una buena sedimentación de la arena y algunos fragmentos que no logran separarse del fondo pero que tienen claramente una densidad cercana a la del medio y una fracción de fragmentos finos que flota. Esto puede apreciarse en la llustración 31 adonde hay un sedimento (arena), partículas moviéndose en el seno de la disolución (densidades similares al cloruro de calcio saturado) y las que flotan (plásticos y fragmentos de madera).



Ilustración 31: Flotación en cloruro de calcio acuoso saturado de las muestras obtenidas en Jacó el 5 de mayo del 2018.

PLÁSTICOS ENCONTRADOS EN PUNTARENAS: ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA

Se analizó una muestra de los plásticos encontrados en la zona de post-berma en la playa de Puntarenas mediante espectroscopía infrarroja. En las muestras analizadas se encontró polietileno y polipropileno, ambos con alguna cantidad de otra sustancia no identificada que podría ser un polietilenglicol o alcohol polivinílico pues presenta absorciones en la región C-O estiramiento y pequeñas absorciones de O-H estiramiento. Este aditivo podría explicar por que los fragmentos analizados son típicamente fragmentos no esféricos pues un aditivo plastificante podría conferirles propiedades elásticas que disminuyen su degradación mecánica en la playa. Los polietilenos y polipropilenos menos flexibles, y por tanto más rígidos, podrían sufrir una degradación mecánica para convertirlos en fragmentos esféricos. Este aspecto de la degradación de plásticos en playas requiere de un análisis más extenso.

Tabla. Identidad de las muestras analizadas por infrarrojo y sus características

Muestra	Plástico presente	Bandas características (cm-1)	Comentarios*	Bandas no reconocidas (cm-1)	
1	polietileno	2915, 2848, 1472 y 1462	Ausencia de bandas de estiramiento características de metilo o metino.	1031, 1376, 3383	
2	polietileno	2915, 2847, 1472 y 1462	Idem. Menor grado de contaminación con desconocido.	1029, 3397	
3	Polipropileno	2942, 2918, 2867, 2848, 1452, 1375	Bancas características de estiramiento C-H de metilos y metilenos con doblamiento de metilos y metilenos	1030	
4	polietileno	2914, 2848, 1471	Polietileno de alta pureza.		
5	Polipropileno	2942, 2918, 2867, 2848, 1452, 1375	Polipropileno con bajo contenido de impureza.	Débil a ca. 1030	

^{*}Se identificaron en las muestras solamente polietileno y polipropileno.

Ilustración 32.

Muestra de plástico 1. Polietileno con aditivo supuesto polietilenglicol.



Ilustración 33.

Muestra 2. Polietileno con aditivo supuesto polietilenglicol.

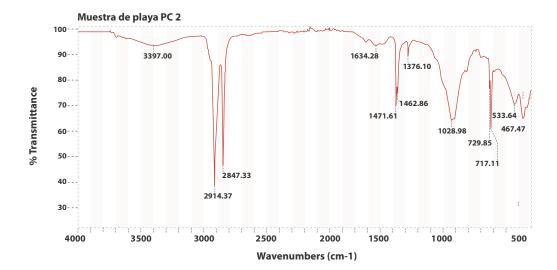


Ilustración 34.

Muestra 3. Polipropileno con aditivo supuesto polietilenglicol

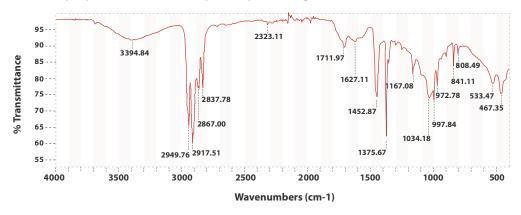


Ilustración 35.

Muestra 4. Polietileno de alta pureza

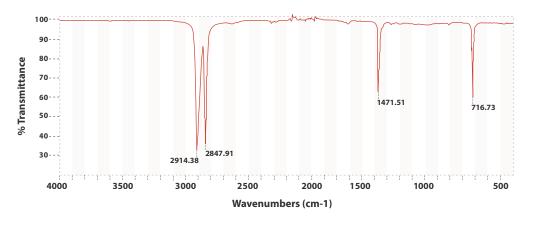
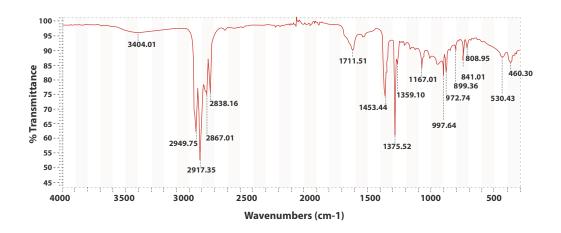


Ilustración 36.

Muestra 5. Polipropileno de alta pureza con leve contenido de contaminante.



PROCEDIMIENTO VALIDADO

Con base en los resultados y observaciones obtenidos se procede a generar el siguiente procedimiento validado para el análisis de plásticos en arena de playa.

PREPARACIÓN DE DISOLUCIONES

Para efectuar las separaciones se requiere de varias disoluciones cuya preparación se detalla a continuación

CLORURO DE CALCIO SATURADO

Se agrega cloruro de calcio sólido, grado alimentario, al volumen de agua que se desea saturar. Se agita mediante una paleta de agitación y un taladro (Ilustración 32). La disolución se calentará considerablemente. Se debe dejar enfriar hasta temperatura ambiente y se vuelve a disolver cloruro de calcio sólido en la disolución. Si hay una disolución considerable se volverá a calentar espontáneamente. Esto se repite hasta que no haya una disolución considerable de cloruro de calcio a temperatura ambiente ni un calentamiento de la disolución. Debe quedar cloruro de calcio sin disolver en el fondo del recipiente.



Ilustración 37: Aparato para disolver eficientemente las sales

CLORURO DE SODIO SATURADO

La disolución de cloruro de sodio en agua no genera mucho calor por lo que su preparación es más simple. Se agrega cloruro de sodio grado alimentario al volumen de agua que se desea saturar y se agita con una paleta de agitación y un taladro como arriba. Se disuelve poco menos de 0,33 kilogramos de cloruro de sodio por litro de disolución. Se verifica la densidad de la disolución.

ETANOL ACUOSO DENSIDAD 0,88

Se mezclan 1 parte de etanol con 2 partes de agua. Se determina la densidad relativa y si es mayor a 0,88 se agrega más etanol y si es menor, más agua. Se repite hasta tener la densidad relativa deseada.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS DISOLUCIONES

Se pesa un balón aforado de 100,00 mL en una balanza con una precisión de al menos 0,1 g. Se tara y se agrega la solución a determinar su densidad con la ayuda de un embudo de espiga. Se termina de llevar el volumen del analito a la marca de aforo con un gotero o pipeta desechable. Se vuelve a pesar el balón con disolución a analizar y el peso encontrado se divide por el volumen del balón y esa es la densidad relativa.

TOMA DE MUESTRA

El primer paso en la toma de muestra es definir claramente el objetivo del proceso. Se ha encontrado que la zona de rebalaje de la playa no posee grandes cantidades de plásticos o microplásticos. La zona post-berma es una zona que acumulará, año tras año gran cantidad de plásticos poco densos como poliestireno expandido, polietileno y polipropilenos. La muestra no debe de tomarse antes de la marea baja para disminuir la cantidad de agua de mar que contiene. Se delimita un área de 40 cm x40 cm con una herramienta para tal propósito y se toma la capa superior de la arena con una cuchara de construcción (Ilustración 33). El grosor de la capa extraída depende del lugar de la toma de muestra. Si es la zona de rebalaje se toma 1 cm de grosor. Si es la zona post-berma se toman 3 cm.





Ilustración 38: Cuchara y tamiz utilizados para toma de muestra y separación de microplásticos

CONSERVACIÓN DE LA MUESTRA

Si la granulometría de la arena tiene muchos limos la muestra no se suspende en cloruro de calcio en la playa. Se debe entonces guardar en un recipiente cerrado para ser extraída en el laboratorio.

SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS POR SU DENSIDAD RELATIVA

La muestra de arena se combina con al menos dos volúmenes de solución saturada de cloruro de calcio que tenga una densidad relativa de al menos 1,43. Se agita la mezcla para permitir que el plástico flote y se espera un tiempo adecuado a que la arena se sedimente. Si la granulometría de la arena es gruesa y no hay muchos limos la sedimentación es rápida y se puede proceder a decantar la solución con plásticos por un tamiz número 100. Si la granulometría de la arena muestra muchos limos requiere de una sedimentación de la arena mucho más larga. En ese caso se requiere un tiempo de espera para la sedimentación de al menos media hora o hasta juzgar que la arena se ha sedimentado adecuadamente.

Ya sedimentada la arena el líquido supernadante se pasa por un tamiz número 100. Se puede agregar más disolución de cloruro de calcio saturado a la arena para ayudar a trasvasar todo el plástico observado. Los mismos cuidados mencionados antes deben

de tenerse durante este proceso. Luego de esto los fragmentos son lavados con agua y alcohol para luego suspenderlos en una disolución de etanol acuoso con densidad relativa de 0,88. Se permite a las maderas flotar y se decantan utilizando más disolución de etanol acuoso. El residuo se separa del etanol acuoso y se suspende en agua. Los plásticos que flotan son separados por decantación pasando el líquido supernadante por un tamiz 100 y utilizando cuánta agua sea necesaria para obtener los polietilenos y polipropilenos en todas sus formas separados de los demás plásticos y maderas. La cantidad de estos plásticos será considerable si la muestra proviene de la zona post-berma. Si proviene de la zona de rebalaje es probable que su cantidad sea poca.

Una vez separados los fragmentos con densidades relativas entre 0,88 y 1,00 se lavan con etanol y se dejan secando, por al menos 24 horas, en una bandeja, a temperatura ambiente. Luego de este tiempo se pesan en un recipiente tarado como se detalla abajo.

Los fragmentos que se sedimentaron en el agua son extraídos y se suspenden en una disolución de cloruro de sodio saturada. Los fragmentos que flotan son separados por decantación y serán la fracción con densidad relativa entre 1,00 y 1,20. Aquí estarán los derivados del acrilonitrilo, en todas sus formas, los poliestirenos no expandidos y el nylon. La fracción que se sedimenta en el paso anterior contiene los fragmentos de PET y los fragmentos de PVC en todas sus formas (densidades relativas superiores a 1,20).

CUANTIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS DE CADA FRACCIÓN

Cada fracción de plásticos obtenida se lava con agua, luego con etanol y se deja a secar a temperatura ambiente, en una bandeja, al menos 24 horas. Luego de esto se transfiere a un recipiente previamente tarado, utilizando una brocha fina para trasladar todos los fragmentos de plástico y se determina el peso de la fracción de plásticos. La balanza utilizada para esto debe de tener una resolución de 0,001 g (1 mg). El valor del peso obtenido se divide entre el área de la muestra tomada. En el caso de utilizar un marco de 40 cm x 40 cm se dividiría por 0,16 m2 para obtener el peso de plástico por metro cuadrado.



Ilustración.

Diagrama de flujo de procedimiento análisis de microplásticos en arenas de playas

Los objetivos específicos de la toma de muestra nos definen las playas de interés.

Si la muestra se toma en la zona de rebalaje se espera observar partículas muy pequeñas y con composición típicamente de plásticos otros que polietileno o prolipropileno.

Si la muestra se toma en la zona de rebalaje es en la zona de post-berma.

La pendiente de la playa nos definirá lo fino del material que se encuentra en la zona de rebalaje.

Flotación en clorurro de calcio acuoso saturado a temperatura ambiente (ϕ 1,43 mínimo). Si la granulometría de la zona es muy fina se requiere de mucho tiempo para sedimentar, lo que excluye la playa como sitio para la flotación.

La flotación y el pasar por la malla 100 se puede realizar en la playa misma por la granulometría esperada.

La solución super nadante se pasa por una malla 100. De juzgarse necesario se puede volver a realizar la flotación y volver a pasar por la misma malla. Una malla 100 tiene una apertura de 0,014 mm.

La flotación en etanol acuoso de densidad 0,88 nos da flotación de la madera y sedimentación de plásticos y otros.

Lo que pasa la malla es solución de cloruro de calcio usada que puede tener densidad menor a la deseada y se recicla restaurando y dejando que sedimente cualquier materia fina.

El mterial que flota es retirado por decantación del supernadante por una malla 100. De ser necesario se repite la flotación y el decanto.

Si tiene una densidad de 0,88 es madera. Puede haber fragmentos de poliestireno expandido o hule poroso.

Esta fracción se somete a flotación en agua para lograr la separación del polietileno y polipropileno, en todas sus formas.

La solución supernadante se pasa por una malla 100. De juzgarse necesario se puede volver a realizar la flotación y volver a pasar por la misma malla. Una malla 100 tiene una apertura de 0,014 mm. El material que se retiene en la malla está compuesto por polietileno y esta fracción se deja al aire antes de pesar.

La fracción como polietileno y polipropileno se pesa para determinar la cantidad de estos materiales presentes en la muestra.

Esta fracción se somete a la flotación en solución saturada de cloruro de calcio para lograr la separación del PET y el PVC de los otros plásticos en todas sus formas. De juzgarse necesario la operación se repite para separar todos los materiales que flotan.

La fracción que flota en cloruro de sodio saturado tiene alguna proporción de acrilonitrilo (SAN, ASA, ABS, AN) o nylon o poliestireno no expandido.

La fracción que se sedimenta en cloruro de sodio saturado está compuesta por policloruro de vinilo (PVC), sea flexible o rígido, y polietilenterftalato (PET).

La fracción se deja al aire antes de pesar.

la fracción con PS, SAN, ASA, ABS, AN y NY se pesa para determinar la cantidad de estos materiales presentes en la muestra. Por aparte se pesa la fracción con PVC y PET.

FRACCIONES DE PLÁSTICO Y SU CONTENIDO CARACTERÍSTICO

Se toman varios fragmentos de cada fracción de densidad de plásticos y se analizan mediante espectroscopia infrarroja para verificar su identidad. Los resultados esperados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.
Verificación de identidad de plásticos encontrados en fracciones de densidad

Fracción	Plásticos Encontrados		
Densidad menor a 0,90 de la zona post- berma, Puntarenas	Polietileno de muy baja densidad, poliestireno expandido. Hule poroso		
Densidad 0,90-1,00 de la zona post-berma, Puntarenas	Polietilenos y polipropilenos de alta y baja densidad		
Densidad 1,00-1,20 de la zona post-berma, Puntarenas	Copolímeros de acrilonitrilo y nylon		
Densidad 1,20-1,42 de la zona post-berma, Puntarenas	PVC flexible o rígido, PET		

TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Los residuos obtenidos son principalmente arena de playa. Esta puede almacenarse para luego ser llevada de vuelta a una playa. Los fragmentos de madera que se pueden obtener pueden ser descartados en los residuos orgánicos ordinarios o combinados con un compost. Las soluciones salinas se pueden descartar en el mar.

TRATAMIENTO DE SOLUCIONES DE CLORURO DE CALCIO USADAS

Las disoluciones de cloruro de calcio usadas pueden ser reutilizadas combinándolas con cloruro de calcio sólido y agitando hasta que no se disuelve más cloruro de calcio. La disolución resultante se puede almacenar en un dispositivo que permita que los limos y arcillas se sedimenten y no contaminen las disoluciones usadas a futuro. Un recipiente adecuado para este trabajo se muestra en la llustración 34. Son fácilmente disponibles en cualquier supermercado. La salida se encuentra por encima del fondo del recipiente lo que permite que la solución que sale no arrastre los limos u otros sedimentos.

TRATAMIENTO DE SOLUCIONES DE CLORURO DE SODIO USADAS



Ilustración 39: Recipiente apto para el almacenamiento del cloruro de calcio

Las disoluciones de cloruro de sodio utilizadas se pueden recuperar. Luego de decantar las disoluciones de los residuos se puede recuperar la densidad deseada volviendo a saturar con cloruro de sodio sólido.

II PARTE: COSTEO DEL ANÁLISIS DE MICROPLÁSTICOS EN ARENA DE PLAYA

En la Tabla 5 se muestra el coste del análisis de microplásticos en arena de playa, incluyendo el precio sugerido para las organizaciones interesadas en realizar el monitoreo de microplásticos en arena de playa. Este precio no incluye los viáticos que deberán cobrarse tomando como referencia la tabla de viáticos vigente del ministerio de Hacienda.

Las horas de analista en la tabla no incluyen las horas de la persona que va a realizar el muestreo en la playa. Es recomendable que sea el mismo analista el que se desplace a tomar la muestra. Si este es el caso, deberá incluirse en los viáticos el tiempo de traslado de la persona a cada playa en particular.

Tabla 5.
Costeo de metodología de análisis de microplásticos en arena de playa.

Costeo de metodologia de analisis de micropiasticos en arena de piaya.					
Cantidad	Equipo:	Costo Unitario	Cantidad de Análisis para reposición	Costo Depreciado por análisis	
1	Malla 200 de acero inoxidable en marco de madera de 15x15 cm	\$ 20	10	\$ 2.00	
1	Malla 5 mm de acero inoxidable en marco de madera de 15x15 cm	\$ 20	10	\$ 2.00	
1	Espátula	\$ 10	10	\$ 1.00	
1	Cinta métrica	\$ 2	20	\$ 0.10	
1	Contenedor para solución CaCl2 de 5 gal	\$ 65	100	\$ 0.65	
1	Contenedor para solución NaCl de 5 gal	\$ 65	100	\$ 0.65	
1	marco muestreo 40 x 40 cm en madera	\$ 10	10	\$ 1.00	
4	frascos de vidrio 1 L	\$ 3	10	\$ 1.20	
1	balanza electrónica 4 decimales	\$ 5,000	200	\$ 25.00	
1	pinzas	\$ 20	10	\$ 2.00	
1	juego de lupas 4x, 10x, 20x	\$ 20	20	\$ 1.00	
1	espátula 20 cm madera	\$ 5	10	\$ 0.50	
	Reactivos				
1	Kg De Cloruro De Sodio (Nacl) Refinado	\$ 1.0	1	\$ 1.00	
1	Kg De Cloruro De Calcio (CaCl2)	\$ 1.5	1	\$ 1.50	
3	Litros De Agua Potable Libre De Impurezas	\$ 0.1	3	\$ 0.30	
	Total costo insumos y equipo / análisis			\$ 39.40	
	Horas de analista	\$ 8	5	\$ 40.00	
	Total costo insumos y analista	7 0	3	\$ 79.40	
	Margen utilidad por análisis sobre costo	150%		\$ 119.10	
	Precio final análisis (sin viáticos)*	13370		\$ 198.50	
	recto iniai ariansis (siir viaticos)			\$ 150.50	

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Abajo las conclusiones y observaciones más importantes obtenidas durante este trabajo.

OBSERVACIONES

El mar, con su movimiento constante de aguas, causa separación (segregación) de los materiales. La arena no tiene la misma granulometría en diferentes zonas de la playa debido al efecto de sedimentación y arrastre consecuencia de la ley de Stoke. De forma similar, los plásticos en el mar son segregados debido a su densidad. Los más densos que el agua de mar quedan depositados en la zona de rebalaje cuando llegan a la playa. Los fragmentos menos densos que el agua de mar flotan y quedan depositados en los puntos más altos de la playa durante la marea que los acarrea. La arena funciona como un tamiz que retiene las partículas que el agua de mar acarrea. Es por este comportamiento que no es de esperar encontrar polietilenos o polipropilenos, los plásticos de un solo uso más comunes, en la zona de rebalaje de la playa y más bien encontrarlos en la zona post-berma. Algunas playas, como Jacó, que no tienen claramente una zona post-berma debido a que las construcciones humanas han invadido esta zona no muestran acumulamiento de fragmentos pequeños de polietileno. Contrario a esto, una playa como Puntarenas o Guacalillo, que tienen zonas claramente formadas de arenas más allá de la de la zona de rebalaje si pueden acumular plásticos tipo polietileno y polipropileno.

CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Del presente trabajo de investigación y desarrollo de una metodología para el monitoreo de microplásticos en arena de playa, podemos afirmar las siguientes conclusiones:

- 1. La metodología desarrollada con base en las densidades de los diferentes polímeros plásticos, y de los resultados de la validación, nos indica que los microplásticos que se encuentran en la arena de las playas, en la zona de rebalaje, corresponden a los polímeros de mayor densidad, como el PVC, el Polietilenglicol-terftalato, nylon y otros menos comunes como los copolímeros de acrilonitrilo (ASA, ABS y ABA)
- 2. Lo anterior nos indica que el monitoreo de microplásticos en arena de playas no es un parámetro adecuado para medir el impacto de una reducción en el consumo de los denominados plásticos de un solo uso que son principalmente bolsas de polietileno y polipropileno en sus diferentes variantes.
- 3. Para medir el impacto de los plásticos de un solo uso, se deben realizar muestreos en cuerpos de agua mar adentro, preferiblemente en zonas donde convergen diferentes corrientes y concentran los materiales flotantes, en especial los plásticos de un solo uso. Estos materiales, por su efecto vela, son muy fácilmente arrastrados por el agua y se encuentran, por la misma razón, a profundidades variables dependiendo del viento.
- 4. Por otro lado, esta metodología si es una herramienta útil para medir el impacto del consumo de plásticos más pesados empleados en envases como el PET, que se encontraría en la zona de rebalaje, y en materiales de construcción como el PVC.

- 5. La mejor zona para muestreo de microplásticos es la zona que se encuentra luego de la berma y que hemos llamado en este documento post-berma. Ahí encontraremos los fragmentos de degradación mecánica de productos más masivos como envases de galón de polietileno, otros envases grandes y productos de polipropileno de mayor tamaño que durante su viaje por los ríos al más sufren degradación mecánica a fragmentos pequeños y con forma más o menos redondeada (ver llustración 29).
- 6. El muestreo debe realizarse tomando en cuenta la marea baja, lo que permite mejores condiciones. Bajo ninguna circunstancia se debe muestrear bajo condiciones de lluvia o a tiempos previos a la marea baja.
- 7. Se recomienda realizar el muestreo al menos una vez cada seis meses, una en temporada seca y otra en temporada de lluvia.
- 8. El manejo de la muestra depende de la granulometría de la arena. Si es muy fina, que sucede en playas de pendiente pequeña, dará problemas de sedimentación por lo que se recomienda llevar la muestra al laboratorio para ahí separar los plásticos por flotación.
- 9. La metodología desarrollada es muy amigable y de bajo costo, con lo cual se podría monitorear las playas de todo el país y montar una base de datos que permita medir la evolución en la concentración y tipo de microplásticos.
- 10. La cantidad de plásticos presente en la zona post-berma de la playa de Puntarenas es considerable, encontrándose 41 g/m2
- 11. La cantidad de plásticos presentes en la zona de rebalaje de las playas de Guacalillo y Jacó fue muy pequeña y puede deberse a la época en que se tomó la muestra. Se requiere de una balanza de alta precisión para poder cuantificarla.
- 12. El deterioro de los tamices 200 fue muy rápido por lo que recomendamos mejor usar tamices 100 que son más resistentes a la corrosión sin un cambio importante en el tamaño de partícula que dejan pasar.
- 13. El precio del análisis para una playa es de \$200. Este precio no incluye los viáticos ni costos de movilización a las playas escogidas.
- 14. La inversión para la compra del equipo ronda entre los \$5000 y \$6000, siendo el mayor costo la balanza de 4 decimales.

BIBLIOGRAFÍA

- Association of Plastic Manufacturers. (2017). Plastics-The Facts 2017, An analysis of European Plastics Production, demand and waste data. 14 marzo 2018, de Association of plastics Manufacturers, Sitio web: https://www.plasticseurope.org/application/ files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf
- Gent, M.R., Menendez, M., Toraño, J., Diego, I. (2009). Recycling of plastic waste by density separation: Prospects for optimization. Waste Management & Research, 27, 175-187.
- 3. Avio, C.G., Gorbi, S., Regoli, F. (2016). Plastics and microplástics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat. Marine Environmental Research, 30, 1-10.
- 4. Decreto No. 31837-S del 21 de junio del 2004: Reglamento de requisitos, condiciones y controles para la utilización de combustibles alternos en los hornos cementeros.
- 5. Maki Akiyama. (2011). Swash zone and beach morphology. 12 de abril 2018, de Wikipedia Sitio web: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Swash_zone_and_beachface_morphology.JPG.
- 6. J. Reisser, B. Slat, K. Noble, K. du Plessis, M. Epp, M. Proietti, J. de Sonnerville, T. Becker y C. Pattiaratchi. (2015). The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. Biogeosciences, 12, 1249-1256.
- 7. Lebreton, L.C.M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.W., Slat, B., Andrade, A. & Reisser, J.. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. Nature Communications, 8, 1-10.
- 8. Kooi, M., Reisser, J., Slat, B., Ferrari, F.F., Schmid, M.S., Cunsolo, S., Brambini, R., Noble, K., Sirks, L.A., Linders, T.E.W., Schoeneich-Argent & R.I., Koelmans, A.A.. (2016). The effect of particle properties on the depth profile of buoyant plastics in the ocean. Nature: Scientific Reports, 7, 1-10.
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Palma, S.T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M.L. & Duarte, C.M. (2014). Plastic debris in the open ocean. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111, 10239-10244.
- 10. Law, D.L., Morét-Ferguson, S.E., Goodwin, D.S., Zettler, E.R., DeForce E., Kuklka, T. & Proskurowski, G.. (2014). Distribution of surface plastic debris in the eastern pacific ocena from an 11-year data set. Environmental Science & Technology, 48, 4732-4738.
- 11. Institute of Chemistry University of Tartu, Estonia. (2017). Database of ATR-FT-IR Spectra of Various Materials. 12 de abril 2018, de Institute of Chemistry University of Tartu, Estonia Sitio web: http://lisa.chem.ut.ee/IR_spectra/paint/binders/polyethylene-wax/
- 12. Institute of Chemistry University of Tartu, Estonia. (2017). Database of ATR -FT-IR Spectra of Various Materials. 12 de abril 2018, de Institute of Chemistry University of Tartu, Estonia Sitio web: http://lisa.chem.ut.ee/IR_spectra/textile-fibres/polyamide/
- 13. dos Santos Pereira, A.P., Prado da Silva, M.H., Pereira Lima, É., dos Santos, A. & Tommasini, F.J.. (2017). Processing and Characterization of PET Composites Reinforced with Geopolymer Concrete Waste. Materials Reseach, 20, 1-10.
- 14. Tomado de https://en.wikipedia.org/wiki/Tide el día 24 de mayo, 2018 a las 3:15 p.m.

- 15. Tomado de: https://www.tide-forecast.com/locations/Punta-Arenas-Costa-Rica/tides/latest el jueves 24 de mayo a las 10:00 a.m.
- 16. Datos adaptados de https://www.tide-forecast.com/locations/Punta-Arenas-Costa-Rica/tides/latest. Datos tomados el 24/5/2018 a las 10:30 a.m.
- 17. Foreman, M.G.G., 1977. Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction
- 18. Posada Bustamante, Beatriz. La degradación de los plásticos. Revista Universidad Eafit. No 94. Publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/
- 19. Rojas González, Andrés. Determinación de la degradación térmica de polímeros por análisis de cambio de color. Universidad Nacional de Colombia 2015 -5329874.pdf
- 20. https://www.ecotiendabuceo.es/blog/termoclinas-oceanicas_6.html
- 21. Instituto tecnológico del plástico. España. https://www.aimplas.es/

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Costa Rica, San José, Pavas, Oficentro La Virgen #2 http://www.cr.undp.org/ PNUD 2019

El PNUD forja alianzas con todos los niveles de la sociedad para ayudar a construir naciones que puedan resistir las crisis; promueve y sostiene un tipo de crecimiento que mejora la calidad de vida de todas y todos. Presentes sobre el terreno en unos 170 países y territorios, ofrecemos una perspectiva global y un conocimiento local al servicio de las personas y las naciones.

