

POSIBLES IMPACTOS ECOLÓGICOS DEL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS MARINAS

Ma. Luisa Martínez¹, Karla Salgado²

¹ Instituto de Ecología, A.C., antigua carretera a Coatepec, Xalapa, Ver. 91070, México.
marisa.martinez@inecol.mx

² Instituto de Ecología, A.C., antigua carretera a Coatepec, Xalapa, Ver. 91070, México.
karla.maria.salgado@gmail.com

RESUMEN

La necesidad de contar con mecanismos de generación de energía que sean sustentables y amigables con el ambiente es cada vez más imperante. Recientemente, la generación de energías a partir de los océanos se está promoviendo a nivel mundial, con la expectativa de que las olas y las corrientes marinas cubran las necesidades de corriente eléctrica de una proporción importante de la población mundial. Sin embargo, para que la generación de energía en las costas y océanos sea realmente sostenible, es necesario considerar las zonas óptimas de ubicación de los dispositivos, así como la elección de los materiales y funcionamiento de la infraestructura de la zona costera. Además, la energía sostenible requiere que, al tiempo que se genera, el impacto ambiental se minimice al máximo, de manera que se favorezca la conservación de los ecosistemas naturales. En este trabajo se hace un análisis del posible impacto ecológico que pueden tener las diferencias estrategias de aprovechamiento de energías marinas, y se hacen propuestas sobre las medidas de mitigación que deben ser consideradas. Se consideran diversos grupos de especies y ecosistemas característicos de las zonas costeras, como mamíferos marinos, pastos marinos, arrecifes, manglares, lagunas costeras, playas y dunas costeras.

Palabras clave: Impacto ambiental, energía renovable, dunas costeras, manglares, mamíferos marinos, lagunas costeras

INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles para la generación de energía ha deteriorado al planeta, afectando así a los ecosistemas naturales y a las poblaciones humanas. Entre los efectos negativos podemos destacar la contaminación del aire producto de la combustión de los combustibles fósiles, la contaminación del agua debido a la acidificación, y el cambio en la temperatura global a causa de gases como el CO₂ y gases de efecto invernadero (1). En conjunto, estas alteraciones afectan a los ecosistemas pues se alteran los ciclos biogeoquímicos y el régimen de fenómenos naturales como las tormentas, provocando que éstos sean más intensos (2). Por lo anterior, la generación renovable de energía representa una de las mejores alternativas para reducir la emisión de CO₂ a la atmósfera y en consecuencia, disminuir nuestra contribución al calentamiento global (1).

En este contexto, alternativas de generación renovable de energía como son las de origen eólico, geotérmico, solar y oceánica, han ganado terreno mundialmente ya que disminuyen el impacto directo sobre los ecosistemas y además, proveen el 14% de la demanda energética del mundo (3). Como beneficios podemos mencionar la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, la protección al ambiente, la creación de nuevas oportunidades de empleo y en conjunto, la promoción del desarrollo sustentable. La energía oceánica es especialmente prometedora. La energía generada por vientos marinos, mareas, corrientes, olas, gradientes térmicos y salinos tiene un alto potencial. Sin embargo, el desarrollo de esta tecnología no es ajeno a la necesidad de que se implemente de manera que el impacto en el ambiente sea mínimo y además, se pueda mitigar (4). Así, un requisito indispensable para el desarrollo sustentable de la generación de energía renovable es que sea ambientalmente saludable.

La tecnología para la generación de energía de los océanos aún está en desarrollo, y en consecuencia, el estudio y análisis de los posibles efectos en el ambiente todavía no se exploran a detalle. Sin embargo, ya existen algunos trabajos pioneros que han comenzado a analizar los posibles efectos ambientales y ecológicos que puede tener esta nueva tecnología. Por ejemplo, algunos autores (4, 5) desarrollaron un marco de referencia para determinar los efectos ambientales de la energía del océano, considerando diferentes tipos de dispositivos, los mecanismos de operación, y el impacto en diferentes escalas espaciales y temporales. En este marco de referencia, se analizan los agentes de tensión (stressors) y sus receptores, en el contexto de los riesgos ecológicos ambientales. Los agentes de tensión son factores del ambiente que pueden cambiar con la implementación de la generación de energía renovable durante su ciclo de vida, que incluye la instalación, operación, y desmonte de instalaciones (Figura 1). Los receptores son, a su vez, los elementos de los ecosistemas donde puede ocurrir una respuesta potencial ante la presencia de los agentes de tensión.

Aunque ya existe un marco de referencia adecuado y útil (Figura 1), está claro que aún queda un largo camino por recorrer. Conforme se avance en este frente, se podrán generar y proponer las medidas adecuadas que permitan minimizar y amortiguar dichos impactos. Considerando lo anterior, en el presente trabajo tenemos como objetivo analizar los efectos ecológicos y ambientales que pueden tener diferentes dispositivos de generación de energía en los océanos. En particular, se pretende abordar este objetivo por dos mecanismos: a) hacer un análisis teórico-conceptual sobre los posibles impactos ambientales que pueden ocurrir, tomando como punto de partida el conocimiento que ya se tiene sobre el funcionamiento de los ecosistemas marinos y costeros; y b) examinar la literatura publicada hasta el momento, en especial buscando la evidencia empírica que ya existe al respecto.

Análisis teórico-conceptual

En el marco conceptual propuesto previamente (4), se hace una clara diferencia entre el efecto y el impacto. El efecto se refiere a los cambios en el ambiente, y el impacto a la magnitud y dirección de dichos cambios. En el caso de las nuevas tecnologías, la distinción entre efecto e impacto es crucial. Así por ejemplo, se puede suponer un cierto efecto como resultado del funcionamiento de estas nuevas tecnologías, pero la determinación de la magnitud y la dirección debe determinarse ya sea a nivel de las especies, poblaciones o comunidades, e incluso, cadenas tróficas. Estos cambios pueden ocurrir de manera directa o indirecta, siendo los indirectos los más difíciles de determinar y reconocer. En general, actualmente se tiene mayor información sobre el efecto de estas nuevas tecnologías que sobre el impacto de las mismas.

Sin embargo, aun sin el conocimiento suficiente, partiendo del marco conceptual propuesto previamente (4) (Figura 1), es posible empezar a hacer un análisis de los posibles efectos, considerándolos como generadores de tensión, y los impactos, considerándolos como receptores ambientales.

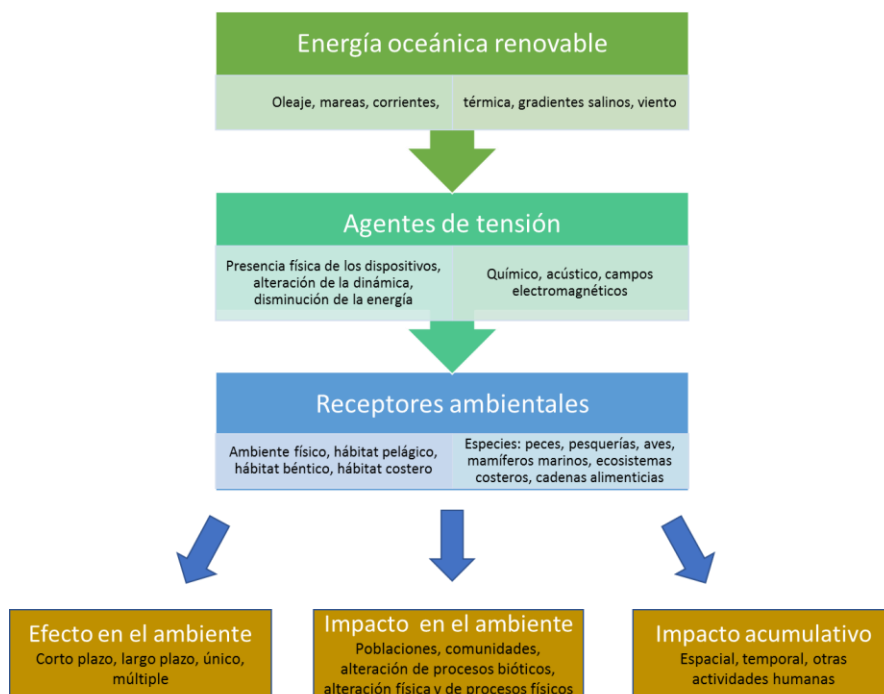


Figura 1. Marco de referencia para analizar los efectos ambientales potenciales de la generación de energía en el océano, considerando diferentes aspectos y escalas. Cada ORED (Ocean Renewable Energy Development) tendrá sus propios agentes de tensión que afectarán a diferentes receptores en diferentes escalas y niveles (modificado de (4)).

Agentes de tensión

Se han propuesto diferentes generadores de tensión: presencia física de los dispositivos; alteraciones de la dinámica de los sistemas; efectos físico-químicos; efectos de ruido; efectos electromagnéticos (Figura 2).

Agentes de tensión potencial de los dispositivos de energía renovable en los océanos

Presencia física	Dinámica de los sistemas	Físico-químico	Acústicos	Electromagnético
<ul style="list-style-type: none"> • Colisión (aves y grandes vertebrados) • Rutas migratorias • Nuevos hábitats (invasión de especies) 	<ul style="list-style-type: none"> • Turbulencia: pequeños vertebrados e invertebrados • Estratificación de la columna de agua • Bloqueo de flujos y sedimentos: costa, ecosistemas costeros 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura, salinidad: plancton, cadenas tróficas. • Temperatura: eutroficación. • Contaminación química para eliminación de organismos en superficies. 	<ul style="list-style-type: none"> • Efecto principal en grandes vertebrados • Cangrejos y langostas también son sensibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración de movimientos en especies sensibles.

Figura 2. Agentes de tensión potenciales que pueden tener los dispositivos generadores de energía renovable en los océanos. Es importante notar que éstos son dependientes de la escala.

- a) Presencia física de los dispositivos. La introducción de nuevas estructuras físicas es el primer elemento de tensión, ya que representa una estructura nueva que afectará arriba y debajo de la superficie del agua. El primer efecto de la presencia física es la colisión. Los mamíferos marinos, las aves y otros grandes vertebrados (tortugas, tiburones) son los grupos que están más expuestos a este riesgo. Las aves pueden experimentar colisiones y cambios en las rutas de desplazamiento por la presencia de dispositivos generadores de energía, particularmente las turbinas que aprovechan la energía del viento ya que son estructuras de gran tamaño (6, 7). Los mamíferos marinos y los grandes vertebrados son los que tienen el mayor riesgo de colisión. En este caso, los impactos pueden ocurrir tanto en las turbinas y estructuras generadoras de energía, y también en la infraestructura utilizada para mantener los dispositivos generadores y los equipos necesarios para el transporte de la energía, tales como los cables o componentes flotantes en la columna de agua. Además de las colisiones, los dispositivos pueden interrumpir rutas migratorias e incluso el movimiento en escala local de los organismos.

Además de la colisión, estas nuevas estructuras pueden funcionar como nuevos hábitats creando arrecifes artificiales, para lo cual ya se tiene evidencia en el caso de las plataformas petroleras en los océanos (8). En este caso, hay que considerar el riesgo de que las comunidades artificiales contengan especies invasoras que afecten a los ecosistemas naturales cercanos.

- b) Alteraciones en la dinámica de los sistemas.- En primer lugar, el movimiento de los dispositivos puede generar turbulencia y alteraciones en las corrientes, de manera que los pequeños vertebrados e invertebrados pueden ser succionados hacia las turbinas. En la columna de agua, las alteraciones en el movimiento del agua y la turbulencia pueden alterar la estratificación de la columna de agua afectando así el movimiento de los organismos y sus interacciones.

Por otro lado, se pueden presentar alteraciones en la dinámica hidrosedimentaria de las costas, resultando en diferentes tipos de efectos: cambios en las corrientes. Bloqueo de flujos, retención de sedimentos. En algunos casos ya se han observado efectos en la costa como resultado de la presencia de granjas eólicas ubicadas en el mar (4).

- c) Efectos físico-químicos.- Los dispositivos OTEC y los de gradientes salinos pueden producir cambios importantes en la temperatura y en la salinidad del agua, afectando, por ejemplo, al plancton y en consecuencia a la cadena trófica. Otra posibilidad es que la mayor temperatura incremente la productividad, causando condiciones de eutrofización y, por ejemplo, brotes masivos de algas. Además, el uso de sustancias químicas para evitar la corrosión y adhesión de organismos puede generar contaminación química en la zona.

Además de lo anterior, la recirculación del agua desde grandes profundidades hacia la superficie puede modificar el gradiente térmico de la columna de agua, además de modificar las características físicoquímicas del agua, ya que éstas son variables dependiendo de la profundidad. Nuevamente, esto podría afectar al plancton.

- d) Efectos acústicos.- El océano es acústicamente diverso y los animales marinos utilizan la acústica para comunicación, orientación y reproducción. La instalación de los dispositivos de generación de energía será la más ruidosa (9), pero el funcionamiento de éstos también generará ruido. Se predice que el efecto principal del ruido será en los mamíferos marinos y demás vertebrados. Sin embargo, existen estudios en los que se reconoce que las larvas de cangrejos y langosta utilizan el ruido de los arrecifes para orientarse (10). Aunque no hay estudios de campo que determinen de manera puntual el efecto negativo del ruido sobre las especies sí se ha observado que algunos mamíferos marinos se alejan de la fuente de disturbio (11). El desconocimiento de este tema es grande.

- e) Efectos electromagnéticos.- La transmisión de la energía eléctrica hacia la costa también tiene consecuencias potenciales en el ambiente, ya que durante la transmisión, los cables generarán campos electromagnéticos de baja frecuencia. La evidencia sobre los efectos potenciales de los campos electromagnéticos sobre los organismos marinos aún es incipiente. Sin embargo, existen

algunos estudios donde, por ejemplo, se ha observado que especies como las anguilas modifican sus rutas migratorias en presencia a campos electromagnéticos alterados (12).

Un último aspecto de los efectos potenciales que pueden tener los generadores de tensión es la escala, así como la duración, intensidad y frecuencia. Por ejemplo, el impacto de un solo dispositivo utilizado en los periodos de prueba, puede ser muy local, mínimo e incluso insignificante. Sin embargo, cuando estas nuevas tecnologías se pongan a funcionar en una escala comercial, ocupando grandes extensiones, existirán efectos acumulados con impactos potencialmente mayores e importantes, además de que su intensidad, frecuencia y duración serán también mayores. Así, es necesario analizar los efectos e impactos de estas nuevas tecnologías, considerando las diferentes escalas espaciales y temporales.

Receptores ambientales

Los receptores ambientales son aquellos que reciben el impacto de las modificaciones o alteraciones en el ambiente. Pueden ser el ambiente físico, distintos grupos biológicos (invertebrados, vertebrados, microscópicos), y en diferentes hábitats (pelágico, bentónico, costero) (Figura 3).

Receptores ambientales de los efectos potenciales de dispositivos de energía renovable en los océanos

Ambiente físico	Grupos de especies	Hábitat pelágico	Hábitat bentónico	Ecosistemas costeros
<ul style="list-style-type: none"> Alteración de corrientes Erosión Salinidad Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> Rutas migratorias Ciclos de vida Colisiones Grupos carismáticos: mamíferos marinos y aves 	<ul style="list-style-type: none"> Estructuras físicas Concentración o eliminación de especies. Plancton, cadenas tróficas. 	<ul style="list-style-type: none"> Circulación y corrientes del agua Biocidas: problemas de fijación Bentos modificado. 	<ul style="list-style-type: none"> Playas y dunas costeras. Manglares, lagunas costeras; marismas. Pesquerías

Figura 3. Receptores ambientales de los efectos de tensión potenciales que pueden tener los dispositivos generadores de energía renovable en los océanos. Es importante notar que éstos son dependientes de la escala.

- a) Ambiente físico.- El funcionamiento general de los dispositivos generadores de energía en el océano utilizan la energía cinética del agua para su funcionamiento, lo que probablemente puede resultar en una energía disminuida o modificada. Cuando esto ocurre, ocurren modificaciones en cascada, como es la alteración de las corrientes litorales y su consecuente alteración en las costas, generando zonas de acumulación de sedimentos, y zonas de erosión, afectando así procesos de la playa (13). Son necesarios estudios para comprender el impacto en la costa como resultado de alteraciones en los regímenes de oleaje. Es necesario explorar estos fenómenos considerando la implementación de estos dispositivos en escalas comerciales.

Otros posibles receptores de los tensores ambientales podrían ser las lagunas costeras y manglares, sobre todo en el caso del uso de los gradientes salinos. Los cambios en los gradientes salinos en estos ecosistemas, probablemente alteren el funcionamiento de los organismos adaptados a la salinidad. Por otro lado, la energía por gradientes térmicos modificará la temperatura de la columna de agua, resultando en condiciones alteradas, las cuales pueden generar procesos de eutrofización.

- b) Diferentes grupos de especies (peces, mamíferos, aves).- Diversos grupos de animales pueden verse afectados por los dispositivos generadores de energía. Por ejemplo, las modificaciones en el hábitat pelágico pueden resultar en cambios en la estructura y composición de las comunidades. Por otro lado, si estas estructuras se ubican de manera que se interrumpen las rutas migratorias de las especies, puede haber consecuencias en, por ejemplo, el ciclo de vida, pudiendo afectar a largo plazo la supervivencia de las especies.

Los mamíferos y las aves marinas son de particular interés por su gran visibilidad y el mayor interés del público. Como ya se mencionó, estos grupos de organismos corren el riesgo de sufrir colisiones y enredarse en los dispositivos, aunque también existe evidencia de que son capaces de esquivarlos. No se sabe si el costo energético de evitar estos impactos será excesivo para los organismos o no.

- c) Hábitat pelágico.- El ambiente pelágico se refiere a las aguas libres del océano que no están en contacto con el fondo. Se trata de una gran masa de agua que se ha subdividido en zonas según dos dimensiones: vertical y en sentido horizontal. En general, los dispositivos para la generación de energía en los océanos, como boyas, turbinas, soportes, cables, etc., modificarán el hábitat pelágico al representar estructuras que no existían previamente. El mayor impacto será probablemente en la distribución de peces, y otros vertebrados, por ejemplo.

Además de las nuevas estructuras físicas, los cambios en la temperatura, salinidad y composición química del mar pueden resultar en alteraciones importantes en el plancton y, en consecuencia, en las cadenas tróficas, pudiendo resultar en efectos en cascada que podrían tener consecuencias a gran escala.

- d) Hábitat bentónico.- Este se refiere al fondo de los cuerpos de agua. Los dispositivos generadores de energía oceánica probablemente modificarán la circulación del agua y las corrientes. Al cambiar la estructura de la zona bentónica, es posible que se modifiquen la estructura y composición de las comunidades y ecosistemas de los ecosistemas bentónicos. Además, el uso de biocidas para evitar el crecimiento de organismos sobre las estructuras productoras de energía podría afectar la posibilidad de adhesión de los organismos sobre sus sustratos naturales como arrecifes, rocas e incluso la arena.

Un ejemplo notable de modificaciones del hábitat bentónico como resultado de las actividades humanas y su infraestructura son las zonas aledañas a las plataformas petroleras donde las acciones de limpieza y eliminación de organismos adheridos, ha cubierto el fondo arenoso por una capa de conchas. Con esto el ambiente ha cambiado y las comunidades también (8).

- e) Ecosistemas costeros.- Las modificaciones potenciales en el flujo de agua (corrientes, mareas) y sedimentos, puede generar erosión y acreción en dimensiones que no son acordes con la dinámica natural de las costas y playas. En esta situación, la geomorfología de estos ambientes nuevamente pueden modificarse afectando de esta manera a la estructura y composición de la vegetación de las playas y primer cordón de dunas costeras (14). Al cambiar esta combinación biogeomorfológica, la capacidad de respuesta (y en consecuencia de protección) puede verse alterada, afectando en consecuencia a las poblaciones aledañas.

Por otro lado, otros ecosistemas acuáticos como lagunas costeras, manglares y marismas son sensibles a alteraciones en la temperatura del agua y la salinidad. Por ello, también son receptores potenciales de los generadores de tensión mencionados arriba. Nuevamente, las consecuencias potenciales son cambios en la estructura y composición de las comunidades, resultando en incluso, modificaciones en las cadenas tróficas. En particular, estos ecosistemas son de especial relevancia para la sociedad, ya que es aquí donde ocurre la reproducción de muchas especies comerciales de peces.

Conforme las acciones de conservación evolucionen hacia conservación basada en ecosistemas será necesario considerar la complejidad de los ecosistemas como los receptores de los generadores de tensión.

Dado el conocimiento incipiente de los agentes de tensión que potencialmente pueden producir los dispositivos generadores de energía eléctrica y los receptores ambientales, es fundamental contar con una línea base de las especies y ecosistemas que se podrían ver afectados. Esta información podría ser: presencia/ausencia de especies, abundancia, diversidad, composición de especies y dinámica de los sistemas. Así, considerando lo anterior, en el Cuadro 1 se presentan los agentes de tensión potenciales para cada tipo de energía, así como los receptores ambientales. Se propone una serie de medidas de mitigación que podrían seguirse para disminuir el impacto.

Una alternativa que es importante considerar es la selección de los sitios para la instalación de los dispositivos. Así, además de considerar las condiciones idóneas para la generación de energía, hay que tomar en cuenta que las condiciones ambientales en cuanto a generadores de tensión y receptores son las óptimas. Así, la pérdida de hábitats disminuirá si se eligen los lugares adecuados para instalación y si los tipos de dispositivos minimizan su efecto sobre el ambiente.

Tabla 1. Análisis de la huella ecológica potencial, especies y ecosistemas en riesgo y medidas de mitigación para las nuevas tecnologías de generación de energía en los océanos (información de 6, 15, 16).

TIPO DE ENERGÍA	IMPACTO AMBIENTAL (generadores de tensión)	ECOSISTEMAS Y ESPECIES EN PELIGRO (receptores)	MEDIDAS DE CONTROL Y MITIGACIÓN
Mareas	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración flujos hídricos • Modificación gradientes de salinidad • Bloqueo de rutas migratorias • Modificación dinámica sedimentaria • Captura y muerte de organismos en filtros y equipo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arrecifes • Etapas juveniles • Playas y dunas costeras • Lagunas costeras • Estuarios • Manglares • Peces/pesquerías • Mamíferos marinos • Cambios en la biodiversidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar zonas con arrecifes • Evitar criaderos • Mantener dinámica de bocas de estuarios y lagunas • No alterar la barra arenosa • Regulación de turbinas para que o bloqueen flujos y sedimentos • Regulación de turbinas para que no atrapen organismos • Utilizar plantas pequeñas
Oleaje	<ul style="list-style-type: none"> • Modificación del oleaje • Recirculación del agua/plancton • Modificación de la dinámica sedimentaria • Modificación de zonas de reproducción • Modificaciones en disponibilidad de alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Etapas juveniles • Playas y dunas costeras • Lagunas • Estuarios • Manglares • Peces/pesquerías • Mamíferos marinos • Aves marinas • Cambios en la biodiversidad • 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar zonas con arrecifes y hábitats sensibles • Evitar criaderos • Utilizar plantas pequeñas
Gradientes Salinos	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración de flujos hídricos • Modificación gradiente de salinidad • Captura y muerte de organismos en filtros y equipo • 	<ul style="list-style-type: none"> • Lagunas costeras • Estuarios • Manglares • Peces/pesquerías • Cambios en la biodiversidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar zonas con arrecifes y hábitats sensibles • Evitar criaderos • Utilizar plantas pequeñas
Conversión de energía Térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento del agua • Contaminación química • Captura y muerte de organismos en filtros y equipo • Alteración de la termoclina 	<ul style="list-style-type: none"> • Arrecifes • Etapas juveniles • Medusas • Crustáceos • Peces/pesquerías • Mamíferos marinos • Especies sensibles como <i>Limulus polyphemus</i> (cacerolita de mar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar zonas de arrecifes y hábitats sensibles • Evitar criaderos • Prevenir descargas con gradientes de temperatura • Evitar contaminación química

TIPO DE ENERGÍA	IMPACTO AMBIENTAL (generadores de tensión)	ECOSISTEMAS Y ESPECIES EN PELIGRO (receptores)	MEDIDAS DE CONTROL Y MITIGACIÓN
Energía Eólica de la Costa	<ul style="list-style-type: none"> • Modificación del flujo del viento • La vibración afecta a mamíferos y aves marinos • Contaminación visual y auditiva 	<ul style="list-style-type: none"> • Aves migratorias • Mamíferos marinos 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar plantas pequeñas • Evitar rutas migratorias

Evidencia

A pesar de la relevancia de la generación renovable de energía, los estudios donde se analicen los efectos e impactos en el ambiente aún son incipientes. Para analizar la evidencia empírica sobre el posible impacto ambiental que pueden tener los generadores de energía en los océanos, se hizo una búsqueda de la literatura especializada tanto en Web of Science como en Google Académico, utilizando las siguientes palabras clave: “ocean renewable energy environmental impacts”.

Es interesante notar que la información es realmente escasa (Tabla 2). Por ejemplo, en la base de datos de Web of Science, al buscar “renewable energy” se obtienen 46,332 publicaciones. De éstas, 855 contienen la palabra “ocean”. Si se continúa refinando la búsqueda, añadiendo la palabra “environment”, se obtiene que solamente existen 142 trabajos, pero no todos se enfocan directamente en las posibles consecuencias ecológicas de las energías oceánicas. En la Tabla 2 se presenta una muestra de algunas publicaciones donde se analiza el efecto en el ambiente. Existe una gran coincidencia en que las principales alteraciones pueden ser colisión, alteración de los flujos hídricos y sedimentarios, modificación de gradientes de temperatura y salinidad, ruido, muerte de organismos en los filtros, campo electromagnético, pérdida de biodiversidad, entre otros. La mayoría de estos análisis son a partir de suposiciones teóricas, ya que no existe mucha evidencia empírica que le dé sustento. Una excepción interesante a esto es un trabajo (17) donde se realizó trabajo experimental para probar el efecto de las turbinas sobre la movilidad de peces. En este caso se encontró que los peces eran capaces de evitar las turbinas, aunque hace falta realizar pruebas en condiciones de oscuridad y con mayores velocidades de movimiento de las turbinas.

En ausencia de datos experimentales, una alternativa es acudir a evidencia indirecta. Por ejemplo, en el caso de los ecosistemas costeros como playas, dunas costeras, manglares y lagunas costeras, las modificaciones en las corrientes, marea, temperatura y salinidad, las cuales ocurren durante las tormentas, permiten hacer inferencias sobre los cambios potenciales que podrían ocurrir.

Tabla 2. Análisis de la evidencia del efecto en el ambiente que podría tener la generación de energía en los océanos (información de 6, 15, 16).

TIPO DE ENERGÍA	EFEECTO EN EL AMBIENTE	TIPO DE EVIDENCIA	CITA
OTEC	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración flujos hídricos • Modificación gradientes de salinidad • Modificación dinámica sedimentaria • Captura y muerte de organismos en filtros y equipo. 	Supuestos teóricos	Abbasi & Abbasi 2007 (18)

TIPO DE ENERGÍA	EFEECTO EN EL AMBIENTE	TIPO DE EVIDENCIA	CITA
Mareas	<ul style="list-style-type: none"> • Arreglo espacial de turbinas modifica corrientes, pero no nivel del agua 	Modelación	Ahmadian & Falconer 2012 (19)
Energía oceánica en general	<ul style="list-style-type: none"> • Fondo del mar; suspensión de sedimentos y contaminantes; • Alteración hidrológica; • Colisiones; daño físico a organismos; • Campo electromagnético; • Contaminación; • Ruido; • Efecto acumulado • Modificación gradiente de salinidad • Captura y muerte de organismos en filtros y equipo 	Taller de discusión	Cada et al. 2007 (20)
Energía oceánica en general	<ul style="list-style-type: none"> • Turbidez; • Oxígeno, • Comunidad béntica; • Ruido; • Campos electromagnéticos; • Colisión; • Nuevos hábitats; • Ciclo de vida; 	Supuestos teóricos	Gill 2005 (21)
Energía oceánica en general	<ul style="list-style-type: none"> • Hábitat béntico; • Campos electromagnéticos; • Colisión; • Acústico; • Columna de agua; • Ruido; 	Supuestos teóricos	Uihlein and Magagna 2016 (22)
Energía oceánica en general	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida y degradación de hábitats; • Colisión; • Ruido; • Campos electromagnéticos; • Arrecifes artificiales; • Agregación de peces; • Protección de sobre-explotación 	Supuestos teóricos	Inger et al. 2009 (7)
Energía oceánica en general	<ul style="list-style-type: none"> • Colisión • Degradación de hábitats 	Supuestos teóricos	Moriarty & Honnery 2012 (23)

TIPO DE ENERGÍA	EFFECTO EN EL AMBIENTE	TIPO DE EVIDENCIA	CITA
Mareas	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del sedimento 	Modelación numérica; observaciones de campo	Neill et al. 2012 (24)
Mareas	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del sedimento • Mortalidad de peces • Pérdida de biodiversidad 	Experimentos de campo	Waters & Aggidis 2016 (25)
Turbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Movimiento de los peces 	Experimentos de laboratorio, con peces	Zhang et al. 2017 (17)

CONCLUSIONES

A pesar de que la literatura sobre el impacto de las energías marinas en los ecosistemas va en aumento, aún faltan estudios que determinen de manera puntual el efecto en la biodiversidad y en el funcionamiento de los ecosistemas, sobre todo si promete ser una fuente potencial de generación de energía eléctrica a futuro.

El análisis de los efectos ecológicos requiere la identificación y cuantificación de los agentes generadores de tensión, de los efectos sobre el ambiente y de los impactos en diferentes escalas (4). A partir de este conocimiento es que se puede determinar el nivel de tensión que resisten los sistemas biológicos para que mantengan su estructura y funcionamiento.

Otro aspecto importante es la ubicación de los dispositivos, la cual debe decidirse a partir de las condiciones en las que la generación de energía sea óptima, pero considerando que el impacto sobre el ambiente sea mínimo. Por ejemplo, en este caso, comunidades pobres en especies, con especies oportunistas, colonizadoras o resilientes, podrían ser lugares adecuados (21). De cualquier manera, la instalación de estos dispositivos debe tomar en cuenta a los ecosistemas que se podrían ver afectados, y deben incluir propuestas para mitigar el impacto durante la instalación, funcionamiento y desmantelamiento de la tecnología. Sin duda, existe una necesidad urgente de estudiar los efectos de la generación de energía en los océanos sobre los ecosistemas marinos, acuáticos y costeros, que incluya el funcionamiento de los mismos. Lo anterior requiere el establecimiento de una línea basal de funcionamiento, y de la generación de conocimiento científico. El conocimiento ecológico necesita formar parte del desarrollo de las nuevas tecnologías, para que los ecosistemas marinos y costeros sean conservados adecuadamente.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Barbir F, Veziroglu TN, Plass Jr. HJ. 1990. Environmental damage due to fossil fuels use. *Int. J. Hydrogen Energy*. Vol. 15(10): 739-749.
- 2 Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*. Vol. 7: 494-499.
- 3 World energy assessment 2000 – energy and the challenge of sustainability. New York: UNDP; 2000 (ISBN 9211261260).
- 4 Boehlert, G.W. and Gill, A.B. 2010. Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: A current synthesis. *Oceanography* 23: 68-81.
- 5 McMurry, G.R. 2008. Wave energy ecological effects workshop: Ecological assessment briefing paper. Pp. 25-66 in *Ecological effects of wave energy development in the Pacific Northwest: A scientific workshop*. October 11-12, 2007, G.W. Boehlert, G.R. McMurray, and C.E. Tortorici, eds, NOAA Technical Memorandum NMFS-F/SPO-92.
- 6 Grecian J, Inger R, Attrill M, Bearhop S, Godley B, Witt M, Votier E. 2010. Potential impacts of wave-powered marine renewable energy installations on marine birds. *International Journal of Avian Science*. Vol. 152(4): 683-697.
- 7 Inger, R., Attrill, M.J., Bearhop, S., Broderick, A.C., Grecian, W.J., Hodgson, D.J., Mills, C., Sheehan, E., Votier, S.C., Witt, M.J., & Godley, B.J. 2009. Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research. *Journal of Applied Ecology* 46: 1145-1153.

- 8 Goddard, J.H.R., and M.S. Love. 2008. Megabenthic invertebrates on shell mounds under oil and gas platforms off California. MMS OCS Study 2007-007. Marine Science Institute, University of California, Santa Barbara, California. MMS Cooperative Agreement No. 1435-MO-08-AR-12693, 43 pp. Available online at: www.mms.gov/omm/Pacific/enviro/EAS/2007-007.pdf
- 9 Thomsen, F., Lüdemann, K., Kafemann, R. and Piper, W. (2006). Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish, Biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd.
- 10 Montgomery, J.C., A. Jeffs, S.D. Simpson, M. Meekan, and C. Tindle. 2006. Sound as an orientation cue for the pelagic larvae of reef fishes and decapod crustaceans. *Advances in Marine Biology* 51:143–196.
- 11 Madsen PT, Wahlberg M, Tougaard J, Lucke K, Tyack P. 2006. Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 309:279-295.
- 12 Westerberg, H., and I. Lagenfelt. 2008. Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel. *Fisheries Management and Ecology* 15:369–375.
- 13 Miller, D.L., H.C.M. Smith, and D.E. Reeve. 2007. Modeling analysis of the sensitivity of shoreline change to a wave farm. *Ocean Engineering* 34:884–901.
- 14 Stallins, J.A. 2006. Geomorphology and ecology: unifying themes for complex systems in biogeomorphology. *Geomorphology* 77(3): 207-216.
- 15 Pelc, R., and R. Fujita. 2002. Renewable energy from the ocean. *Marine Policy* 26:471–479.
- 16 Montero-Sousa, J.A.M., & Calvo Rolle, J.L. 2013. Energía mareomotriz: perspectiva histórica y estado actual. *Revista Técnica industrial* (301): 54-60.
- 17 Zhang, JB, Kitazawa, D., Taya, S., Mizukami, Y. 2017. Impact assessment of marine current turbines on fish behavior using an experimental approach based on the similarity law. *Journal of Marine Science and Technology* 22: 219-230.
- 18 Abbasi, S. A., & Abbasi, N. 2007. The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. *Applied Energy* 65(1): 121-144.
- 19 Ahmadian, R., & Falconer, R.A. 2012. Assessment of array shape of tidal stream turbines on hydro-environmental Impacts and power output. *Renewable Energy* 44: 318-327.
- 20 Cada, G., Ahlgrimm, J., Bahleda, M., Bigford, T., Damiani-Stavrakas, S., Hall, D., Moursund, R., Sale, M. 2007. Feature: bioengineering. *Fisheries* 32: 174-181.
- 21 Gill, A.B. 2005. Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *Journal of Applied Ecology* 42: 605-615.
- 22 Uihlein, A. & Magagna, D. 2016. Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58: 1070-1081.
- 23 Moriarty, P. & Honnery, D. 2012. What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 244-252.
- 24 Neill, S.P., Jordan, J.R., Couch, S.J. 2012. Impact of tidal energy converter (TEC) arrays on the dynamics of headland sand banks. *Renewable Energy* 37: 387-397.
- 25 Waters, S., & Aggidis, G. 2016. Tidal range technologies and state of the art in review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59: 514-529.