



TRABAJO FIN DE GRADO

---

GRADO EN  
CIENCIAS DEL MAR

# Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

**Alumno:** Nicolás Rodríguez Victory

**Tutor:** Ana M<sup>a</sup> Hernández Martínez

**Curso Académico:** 2023/24



**Impacto acumulativo del  $^{137}\text{Cs}$  en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

**ÍNDICE**

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS .....	V
RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. RADIOACTIVIDAD Y RADIONUCLEIDOS .....	1
1.1.1. NATURALEZA DEL $^{137}\text{Cs}$ .....	2
1.2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA .....	5
1.3. ANTECEDENTES .....	8
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	9
2. OBJETIVOS .....	11
3. MATERIAL Y MÉTODOS .....	12
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	16
4.1. RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA .....	16
4.2. ESTUDIO CRONOLÓGICO DE LA BIOACUMULACIÓN DEL $^{137}\text{Cs}$ EN LA BIOTA MARINA .....	17
4.3. ESTUDIO CRONOLÓGICO DE LA ACUMULACIÓN DEL $^{137}\text{Cs}$ EN LA ABIOTA MARINA .....	20
4.4. ESTUDIO DEL PROCESO DE BIOMAGNIFICACIÓN DEL $^{137}\text{Cs}$ EN LAS CADENAS TRÓFICAS MARINAS .....	22
5. CONCLUSIONES .....	27
6. LÍNEAS FUTURAS .....	28
7. BIBLIOGRAFÍA .....	29
8. WEBGRAFÍA .....	38
9. ANEXOS .....	I

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquematación del proceso de bioacumulación en los organismos marinos y biomagnificación del $^{137}\text{Cs}$ en las cadenas tróficas (Fuente: elaboración propia). ....	5
<b>Figura 2.</b> Cronología de los principales acontecimientos producidos en el accidente de Fukushima el 11 de marzo de 2011, Japón (Jáuregui, 2018). .....	6
<b>Figura 3.</b> Mapas de la de la región de Tohoku (noreste) de Japón y las áreas de evacuación en la prefectura de Fukushima. Donde se muestran los ocho municipios designados como áreas de evacuación obligatoria por el gobierno nacional (Iitate, Katsurao, Kawauchi, Namie, Futaba, Okuma, Tomioka y Naraha). Posteriormente, Hirono y los 3 municipios de Minamisoma, Tamura y Kawamata (no representados). (Adaptado de Morita, Ando y Ohtsu, 2019). .....	6
<b>Figura 4.</b> Mapa de la distribución de la radioactividad liberada tras el desastre de Fukushima (Adaptado de Kinoshita <i>et al.</i> , 2011). .....	7
<b>Figura 5.</b> Evolución de la concentración de $^{137}\text{Cs}$ en el agua de mar en la región de Japón desde la década de 1960 hasta 2010, mostrando los picos debido a las pruebas nucleares atmosféricas y el accidente de Chernóbil (Adaptado de Povinec, Hirose y Aoyama, 2012) .....	8
<b>Figura 6.</b> Niveles de la concentración de actividad de $^{137}\text{Cs}$ durante el periodo de 1974-1898 en Japón, cuyos incrementos se destacan por las pruebas nucleares de China y el accidente de Chernóbil, y la posterior disminución debido a la desintegración radiactiva y la dilución en el medio ambiente marino (Adaptado de Ikeuchi, 2003). .....	9
<b>Figura 7.</b> Área de estudio seleccionada para la presente revisión sobre la acumulación del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino abarcando tres zonas diferenciadas alrededor de la planta nuclear de Fukushima Daiichi. La Zona Norte (líneas rosas), se extiende hasta la bahía de Sendai. La Zona FDNPP (líneas verdes), incluye el área circundante a la planta nuclear. La Zona Sur (líneas azules), se extiende hacia Iwaki (Fuente: elaboración propia). .....	10
<b>Figura 8.</b> Diagrama de flujo de la primera ecuación de búsqueda correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio cronológico de la bioacumulación del $^{137}\text{Cs}$ en la biota marina, aplicando los criterios de inclusión y exclusión. ....	13
<b>Figura 9.</b> Diagrama de flujo de la segunda ecuación de búsqueda correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio cronológico de la acumulación del $^{137}\text{Cs}$ en la abiota marina, aplicando los criterios de inclusión y exclusión. ....	14
<b>Figura 10.</b> Diagrama de flujo de la tercera ecuación de búsqueda correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio de la biomagnificación del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino de Fukushima, aplicando los criterios de inclusión y exclusión. ....	15

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

<b>Figura 11.</b> Distribución anual del número de artículos publicados sobre el impacto del cesio-137 después del accidente de Fukushima, obtenidos tras la búsqueda bibliográfica. ....	16
<b>Figura 12.</b> Frecuencia de aparición de muestras de peces (pelágicos y bentónicos), algas (rojas, verdes y pardas) y animales invertebrados (moluscos, equinodermos y artrópodos) en los artículos seleccionados para el estudio de la biota marina. ....	18
<b>Figura 13.</b> Frecuencia de aparición de las muestras de agua superficial, de fondo y sedimentos marinos en los artículos seleccionados para la abiota marina.....	21
<b>Figura 14.</b> Frecuencia de aparición de los artículos que utilizan modelos de predicción y toma de datos experimentales en campo para el estudio del proceso de biomagnificación en las cadenas tróficas marinas. ....	23

# Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I. 1.</b> Resultados de los documentos utilizados en la revisión bibliográfica sobre la bioacumulación temporal de $^{137}\text{Cs}$ en la biota marina. La tabla presenta el título de cada documento, el tipo de documento (artículo de revisión, experimental, capítulo de libro o informe), los autores, el año de publicación y el tipo de publicación (revista, libro o informe). .....	I
<b>Tabla I. 2.</b> Resultados de los documentos utilizados en la revisión bibliográfica sobre la acumulación temporal de $^{137}\text{Cs}$ en la abiota marina. La tabla presenta el título de cada documento, el tipo de documento (artículo de revisión, experimental, capítulo de libro o informe), los autores, el año de publicación y el tipo de publicación (revista, libro o informe). .....	IV
<b>Tabla I. 3.</b> Resultados de los documentos utilizados en la revisión bibliográfica sobre el proceso de biomagnificación $^{137}\text{Cs}$ en las cadenas tróficas marinas. La tabla presenta el título de cada documento, el tipo de documento (artículo de revisión, experimental, capítulo de libro o informe), los autores, el año de publicación y el tipo de publicación (revista, libro o informe). .....	VII
<b>Tabla I. 4.</b> Resultados de las concentraciones de $^{137}\text{Cs}$ (Bq/Kg) en la biota marina tras el desastre de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Los organismos marinos contemplados son peces pelágicos, peces bentónicos, algas rojas, algas verdes, algas pardas, moluscos, equinodermos y artrópodos en tres ubicaciones: N (área norte), FDNPP (área de la central nuclear de Fukushima Daiichi) y S (área sur). Los datos abarcan el período de 2011 a 2016, donde N.D. indica niveles no detectados para ese año. ....	VIII
<b>Tabla I. 5.</b> Resultados de las concentraciones de $^{137}\text{Cs}$ en la abiota marina tras el desastre de la central nuclear de Fukushima Daiichi). Los tipos de muestra considerados son agua de mar superficial, agua de mar de fondo y sedimentos, en tres ubicaciones: N (área norte), FDNPP (área de la central nuclear de Fukushima Daiichi) y S (área sur). Los datos abarcan el período de 2011 a 2016, donde N.D. indica niveles no detectados para ese año.....	IX

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Bq	Becquerelios, unidad de la actividad de la radiación, indica desintegraciones por segundo.
Carbono-14/ $^{14}_6\text{C}$	Isótopo radiactivo del carbono.
$^{133}\text{Cs}$	Único isótopo estable del cesio.
$^{134}\text{Cs}$	Isótopo radiactivo del cesio. Precursor del cesio-137.
Cesio-137/ $^{137}\text{Cs}$ / $^{137}_{55}\text{Cs}$	El Cesio-137 es un isótopo radiactivo del cesio generado principalmente a través de procesos de fisión nuclear.
Estroncio-90/ $^{90}_{38}\text{Sr}$	Isótopo de estroncio radiactivo producido por la fisión nuclear.
$^4_2\text{He}$	Isótopo de helio no radiactivo y ligero, con dos protones y dos neutrones.
JST	Japan Standard Time/Hora de Japón
mSv	Milisievert. 0,001 Sv.
PBq	Petabecquerel, $10^{15}$ Bq.
Pu	Plutonio.
Radio-226/ $^{226}_{88}\text{Ra}$	Isotopo producido en la cadena de desintegración del Uranio-238, se encuentra en minerales como la uraninita.
Sv	Sieverts, unidad de medida de los efectos biológicos de la radiación.
Tritio/ $^3_1\text{H}$	Isótopo natural del hidrógeno.
U	Uranio.
Uranio-235/ $^{235}_{92}\text{U}$	Isótopo natural con capacidad de fisión, componente principal de rocas y minerales terrestres.
Uranio-238 / $^{238}_{92}\text{U}$	Isótopo natural, componente principal de rocas y minerales terrestres.
Yodo-131/ $^{131}_{53}\text{I}$ / $^{131}_{53}\text{I}$	Radioisótopo del yodo.
$\alpha$	Radiación Alfa.
$\beta$	Radiación Beta.
$\beta^-$	Beta negativa. Radiación Beta respecto a la emisión de electrones.
$\beta^+$	Beta positiva. Radiación Beta respecto a la emisión de positrones.
$\gamma$	Radiación Gamma.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### RESUMEN

Esta revisión bibliográfica aborda el impacto a largo plazo del cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) en el ecosistema marino, desde el accidente nuclear de Fukushima en 2011 hasta 2016. Para ello se propusieron tres objetivos secundarios: estudiar la bioacumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina, su acumulación en la abiota marina y la biomagnificación del  $^{137}\text{Cs}$  en las redes tróficas marinas.

El análisis documental se llevó a cabo entre abril y junio de 2024, utilizando principalmente Google Scholar. Se definieron tres ecuaciones de búsqueda específicas para cada uno de los objetivos secundarios, aplicando criterios de inclusión y exclusión precisos.

Los resultados revelaron que, tras el accidente, las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en los organismos marinos aumentaron drásticamente, especialmente en peces pelágicos y bentónicos. Por ejemplo, en 2012, los niveles en peces bentónicos en Fukushima alcanzaron 114 Bq/kg, descendiendo a 16,4 Bq/kg en 2016. Las algas verdes en Fukushima inicialmente mostraron 2010 Bq/kg en 2011, reduciéndose a niveles no detectables en los años siguientes. Los sedimentos marinos actuaron como reservorios persistentes de  $^{137}\text{Cs}$ , mostrando una disminución más lenta que el agua de mar y los organismos marinos.

El estudio evidenció una disminución gradual de las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  desde el desastre de Fukushima, manteniéndose por debajo del límite de 100 Bq/kg a partir de 2016. Los sedimentos continúan siendo un reservorio significativo, y las especies bentónicas mostraron mayores niveles de  $^{137}\text{Cs}$  debido a su contacto continuo con sedimentos contaminados.

**PALABRAS CLAVE:**  $^{137}\text{Cs}$ ; Fukushima; Acumulación; Bioacumulación; Biomagnificación.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### ABSTRACT

This literature review addresses the long-term impact of cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) on the marine ecosystem following the Fukushima nuclear accident in 2011 to 2016. Three secondary objectives were proposed: to study the bioaccumulation of  $^{137}\text{Cs}$  in marine biota, its accumulation in marine abiota, and the biomagnification of  $^{137}\text{Cs}$  in marine food webs.

The documentary analysis was conducted between April and June 2024, primarily using Google Scholar. Three specific search equations were defined for each of the secondary objectives, applying precise inclusion and exclusion criteria.

The results revealed that, after the accident,  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in marine organisms increased drastically, especially in pelagic and benthic fish. For example, in 2012, the levels in benthic fish in Fukushima reached 114 Bq/kg, decreasing to 16.4 Bq/kg in 2016. Green algae in Fukushima initially showed 2010 Bq/kg in 2011, reducing to non-detectable levels in the following years. Marine sediments acted as persistent reservoirs of  $^{137}\text{Cs}$ , showing a slower decrease compared to seawater and marine organisms.

The study evidenced a gradual decrease in  $^{137}\text{Cs}$  concentrations since the Fukushima disaster, remaining below the limit of 100 Bq/kg from 2016 onwards. Sediments continue to be a significant reservoir, and benthic species showed higher levels of  $^{137}\text{Cs}$  due to their continuous contact with contaminated sediments.

**KEY WORDS:**  $^{137}\text{Cs}$ ; Fukushima; Accumulation; Bioaccumulation; Biomagnification.

# Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. RADIOACTIVIDAD Y RADIONUCLEIDOS

La radiactividad es un fenómeno natural que implica la emisión espontánea de partículas y radiación electromagnética por parte de un núcleo atómico (Núñez-Lagos Roglá, 2011). Este proceso fue descubierto en 1895 por Henry Becquerel, revelando una propiedad intrínseca de ciertos núcleos que hasta entonces había pasado desapercibida (Cortés, 2002).

Existen tres tipos principales de radiactividad: alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), gamma ( $\gamma$ ), las cuales se describen a continuación.

La radiactividad alfa ( $\alpha$ ) implica la emisión de partículas alfa, que son núcleos de helio con dos protones y dos neutrones ( ${}^2_2\text{He}^4$ ). Estas partículas tienen alta capacidad de ionización, pero baja penetración, pudiendo ser detenidas por una hoja de papel o unos pocos centímetros de aire. No obstante, son extremadamente peligrosas si se inhalan o ingieren, causando daños internos significativos, tales como daño celular, mutaciones genéticas, lesiones en tejidos, y un aumento en el riesgo de desarrollar cáncer (Cortés, 2002; Núñez-Lagos Roglá, 2011).

La radiactividad beta ( $\beta$ ) se refiere a la emisión de electrones (beta negativa, beta - o  $\beta^-$ ) o positrones (beta positiva, beta + o  $\beta^+$ ) desde el núcleo de un átomo. En la emisión beta -, un neutrón se convierte en un protón, emitiendo un electrón. El cambio de un neutrón a un protón altera la identidad del elemento. En la beta +, un protón se convierte en un neutrón, emitiendo un positrón. Un positrón es la antipartícula del electrón, con la misma masa, pero carga positiva. Las partículas  $\beta$  penetran más que las  $\alpha$ , aunque son bloqueadas por materiales como aluminio delgado, y pueden causar daños biológicos internos y externos dependiendo de su energía (Cortés, 2002; Núñez-Lagos Roglá, 2011).

Por otro lado, la radiactividad gamma ( $\gamma$ ) consiste en la emisión de fotones gamma de alta energía, generalmente tras una desintegración  $\alpha$  o  $\beta$ . Estos fotones no tienen masa ni carga, a diferencia de los dos tipos de radiactividad anteriores, permitiéndoles penetrar profundamente en los materiales. De este modo, se requieren de mayores espesores para reducir su intensidad, aunque no se detienen tan fácilmente como la radiación  $\alpha$ . La radiación  $\gamma$  es altamente penetrante y puede causar extensos daños biológicos, siendo una de las formas más peligrosas de radiactividad (Cortés, 2002; Núñez-Lagos Roglá, 2011).

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

Respecto a cómo se mide la radiactividad, destacan diversos parámetros que presentan unidades diferentes. La actividad se mide en becquerelios (Bq), que indican desintegraciones por segundo. Mientras que la dosis equivalente, considera el tipo de radiación y sus efectos biológicos, midiéndose en sieverts (Sv) (Jáuregui, 2018; Núñez-Lagos Roglá, 2011).

Los radioisótopos, también conocidos como radionucleidos o radionúclidos, son átomos con núcleos inestables que emiten radiación en forma de partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  o rayos  $\gamma$  mientras se descomponen para alcanzar una configuración más estable (Núñez-Lagos Roglá, 2011). La clasificación de los radionucleidos se basa principalmente en su origen, dividiéndose en naturales y antropogénicos (Cortés, 2002).

Los radionucleidos naturales están presentes en la corteza terrestre desde la formación del planeta Tierra, y se producen a través de procesos geológicos y cósmicos. Ejemplos de estos son el uranio-238 ( $^{238}_{92}\text{U}$ ) y uranio-235 ( $^{235}_{92}\text{U}$ ), que son componentes principales de las rocas y minerales terrestres y tienen vidas medias extremadamente largas, lo que les permite persistir en el medio ambiente. Otro ejemplo, es el radio-226 ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ ), que es un producto de la cadena de desintegración del  $^{238}_{92}\text{U}$  y se encuentra en minerales como la uraninita (Cortés, 2002).

Además, otros ejemplos como el tritio ( $^3_1\text{H}$ ), y el carbono-14 ( $^{14}_6\text{C}$ ), son generados naturalmente en la atmósfera debido a la interacción de los rayos cósmicos con los átomos de nitrógeno (Cortés, 2002).

En contraposición, los radionucleidos antropogénicos son aquellos que resultan de actividades humanas (Cortés, 2002). Estos incluyen isótopos producidos en reactores nucleares, utilizados en medicina, investigación o la industria (Núñez-Lagos Roglá, 2011). Algunos ejemplos son el estroncio-90 ( $^{90}_{38}\text{Sr}$ ), el yodo-131 ( $^{131}_{53}\text{I}$ ) o el cesio-137 ( $^{137}_{55}\text{Cs}$ ), obtenidos como subproductos de la fisión nuclear en reactores nucleares y pruebas de armas nucleares (Jáuregui, 2018).

### 1.1.1. NATURALEZA DEL $^{137}\text{Cs}$

El cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) es un isótopo radiactivo del cesio, un metal alcalino que exhibe una similitud química con el potasio (Filipović-Vinceković *et al.*, 1991). Es uno de los productos de fisión generados por reacciones nucleares, principalmente en reactores de uranio (U) y plutonio (Pu). Posee una vida media de aproximadamente 30,17 años y se desintegra principalmente por emisión  $\beta$  y rayos  $\gamma$ , contribuyendo así a la

## **Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

exposición a la radiación en el medio ambiente (IAEA, 1986; Tokuyama y Igarashi, 1998; UNSCEAR, 2000; Zheng *et al.*, 2012).

El  $^{137}\text{Cs}$  se forma principalmente durante la fisión nuclear, con un rendimiento de aproximadamente 6 átomos de  $^{137}\text{Cs}$  por cada 100 eventos de fisión. Sus precursores incluyen el  $^{134}\text{Cs}$ , que tiene una vida media de 2,07 años y se forma por activación de neutrones del producto final estable de la cadena de fisión del  $^{133}\text{Cs}$  (Brenner *et al.*, 2003; Jia *et al.*, 2000).

Además, están ampliamente distribuidos en la naturaleza debido a diversos orígenes. Por ejemplo, las pruebas de armas nucleares liberaron grandes cantidades de  $^{137}\text{Cs}$  a la atmósfera durante las décadas de 1950 y 1960, dispersándose y depositándose globalmente (IAEA, 1996b). Por otro lado, los desastres nucleares en la Planta de Energía Nuclear de Fukushima en Japón y en Chernóbil en Ucrania liberaron cantidades masivas de  $^{137}\text{Cs}$  al medio ambiente (DRPHH, 2011). Además, el reprocesamiento de combustible nuclear gastado en instalaciones nucleares introduce pequeñas cantidades de  $^{137}\text{Cs}$  en el entorno circundante (Currie, 1999; Manolopoulou *et al.*, 2011).

Por otro lado, debido a su naturaleza, como similitud química con el potasio y su alta solubilidad en agua (Yasunari *et al.*, 2011), el  $^{137}\text{Cs}$ , puede ser transportado fácilmente a través del medio ambiente y las cadenas alimentarias (Turekian, Nozaki y Benninger, 1977; HELCOM-MORS, 2010; Chino *et al.*, 2011), siendo asimilado por plantas y animales. También el  $^{137}\text{Cs}$  tiende a adherirse fuertemente a minerales de arcilla comunes en suelo y sedimentos, limitando su disponibilidad en plantas y animales (Bauman *et al.*, 1979).

### **1.2. COMPORTAMIENTO DEL $^{137}\text{Cs}$ EN EL ECOSISTEMA MARINO**

El ingreso de sustancias radiactivas en los ecosistemas marinos introduce una compleja red de interacciones bioquímicas y ecológicas que afectan la homeostasis ambiental. El  $^{137}\text{Cs}$ , con su larga vida media de 30,17 años y alta solubilidad en agua, es rápidamente asimilado en la cadena alimentaria, iniciando un proceso de bioacumulación que se extiende a través de los organismos marinos (Fisher *et al.*, 2013; UNSCEAR, 2000). Esta acumulación no solo altera la fisiología de los organismos individuales, sino que también puede llevar a la biomagnificación, aumentando su concentración a medida que se transfiere de un nivel trófico a otro (Fisher *et al.*, 2013).

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

El destino de este isótopo en el medio marino depende de una serie de interacciones dependientes en última instancia por la actividad biológica, las condiciones ambientales y fisicoquímicas prevalentes y el comportamiento químico de este radionucleido (Fisher *et al.*, 2013). Tras el desastre nuclear de Fukushima Daiichi en 2011, se intensificó la inquietud sobre la distribución del  $^{137}\text{Cs}$  entre los componentes abióticos y bióticos de los ecosistemas marinos. Este incidente liberó grandes cantidades de radionucleidos en los entornos acuáticos (Ashraf *et al.*, 2014; Franić *et al.*, 2008).

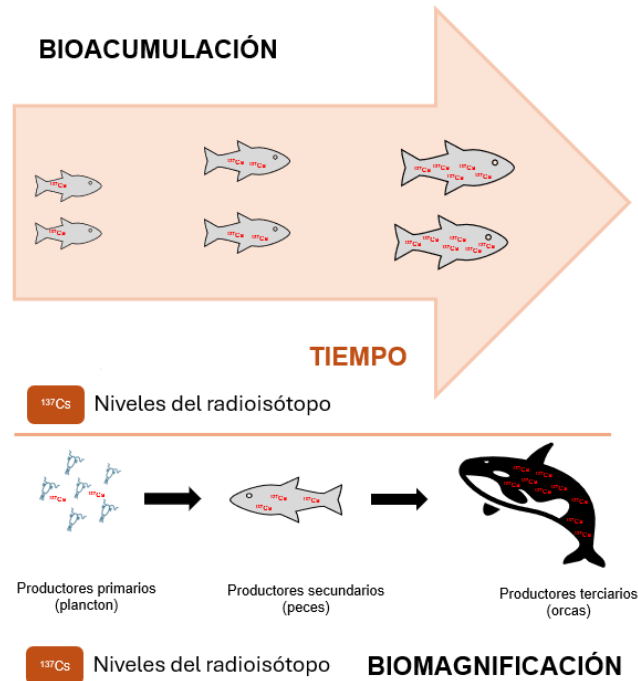
La bioacumulación se refiere al proceso por el que los organismos absorben sustancias químicas del ambiente a una tasa mayor de la que son capaces de eliminarlas. En el caso del  $^{137}\text{Cs}$ , es absorbido por los organismos marinos a través del agua y la dieta. Los productores primarios, como el fitoplancton, absorben el  $^{137}\text{Cs}$  directamente del agua de mar (Heldal, Stupakoff y Fisher, 2001). Este isótopo se transfiere luego a los consumidores secundarios y terciarios que ingieren organismos contaminados. Un ejemplo de esto se puede observar en el estudio de Davée Guimarães, (1992), donde se observó la bioacumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en peces juveniles de mero (*Epinephelus sp.*), los cuales absorbieron el isótopo a través del agua de mar.

Por otro lado, la biomagnificación se refiere al incremento de la concentración de una sustancia a medida que se asciende en la cadena trófica (Gray, 2002). En el caso del  $^{137}\text{Cs}$ , se biomagnifica en las redes tróficas marinas, resultando en concentraciones más altas en los depredadores superiores (Davée Guimarães, 1992; Alava y Gobas, 2016) (Figura 1). Tras el accidente de Chernóbil en Europa, la bioacumulación del  $^{137}\text{Cs}$  se convirtió en motivo de preocupación, observándose acumulaciones importantes en aves acuáticas y peces en entornos marinos y fluviales (Håkanson, Andersson y Nilsson, 1989; Brittain, Storruste y Larsen, 1991). En Estados Unidos, la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  en aves acuáticas y peces en reservorios de reactores nucleares corroboró la tendencia del isótopo a la bioacumulación (I.L. Brisbin Jr., 1991; McCreedy *et al.*, 1997).

Continuando con esta línea, Yoshitome *et al.*, (2003) midieron las actividades de  $^{137}\text{Cs}$  en especies de mamíferos marinos en varias zonas, destacando el área de Fukushima antes del accidente nuclear. En particular, las actividades del isótopo fueron medidas en especies como la foca de piel de norte (*Callorhinus alascanus*, Jordan y Clark, 1898) o en la marsopa de Dall (*Phocoenoides dalli*, True, 1885), con una correlación positiva entre los niveles del radioisótopo y el agua de mar, se observa que aquellos organismos que se alimentan de peces presentan los niveles de concentración más

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

altos del isótopo. Por otro lado, el estudio de Kasamatsu y Ishikawa, (1997) reveló una clara correlación positiva ( $p < 0,05$ ) entre el peso y la concentración de  $^{137}\text{Cs}$  en 276 muestras de peces, así como en el contenido estomacal de 6.066 muestras. Este análisis sugirió que la concentración del radionucleido aumenta con el nivel trófico, destacando un factor de biomagnificación de 2,0.



**Figura 1.** Esquematación del proceso de bioacumulación en los organismos marinos y biomagnificación del  $^{137}\text{Cs}$  en las cadenas tróficas (Fuente: elaboración propia).

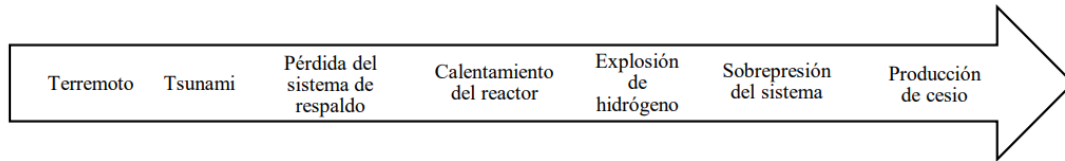
### 1.2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA

El 11 de marzo de 2011 a las 14:46 JST (Japan Standard Time), un evento sísmico de magnitud 9,0, conocido como el Gran Terremoto del Este de Japón, golpeó la región de Japón (Jáuregui, 2018). El epicentro se localizó aproximadamente a 70 kilómetros al este de la península de Oshika, a una profundidad focal de 30 kilómetros, desencadenando una serie de catastróficas secuelas que culminaron en uno de los accidentes nucleares más severos de la historia. Este terremoto provocó un devastador tsunami que superó los 40 metros de altura en algunas localidades, golpeando con brutalidad la costa noreste de Japón y comprometiendo críticamente la infraestructura de la Central Nuclear Fukushima Daiichi (FDNPP), operada por la empresa TEPCO (Steinhauser, Brandl y Johnson, 2014; Jáuregui, 2018).

Las inundaciones resultantes inutilizaron los sistemas de refrigeración de la planta, llevando a explosiones de hidrógeno y a la fusión de tres de los seis reactores nucleares situados en el lugar, específicamente los reactores 1, 3 y 4. La secuencia de

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

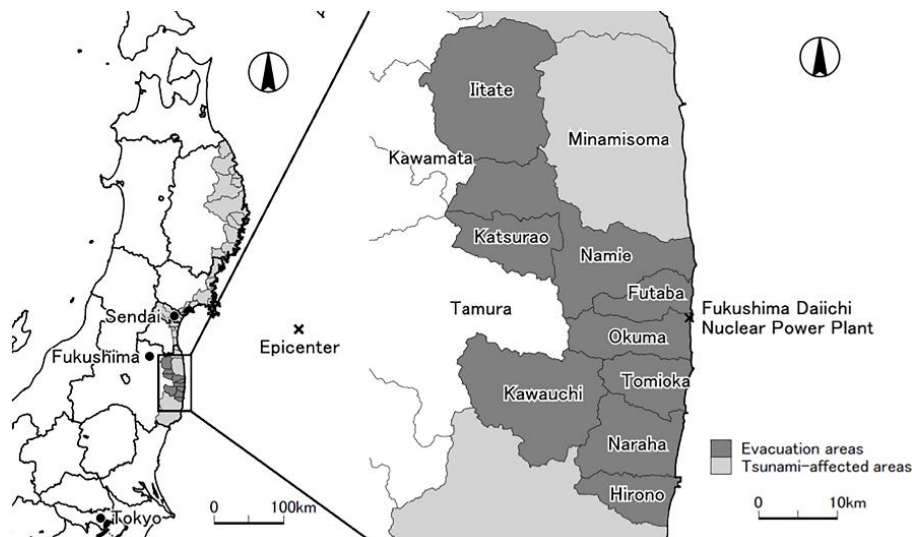
fallos en la planta desencadenó la liberación de significativas cantidades de isótopos radiactivos (**Figura 2**) (Steinhauser, Brandl y Johnson, 2014).



**Figura 2.** Cronología de los principales acontecimientos producidos en el accidente de Fukushima el 11 de marzo de 2011, Japón (Jáuregui, 2018).

Tras el accidente, se estima que el 80% de la lluvia radiactiva se produjo en el océano Pacífico, con una cantidad de  $^{137}\text{Cs}$  calculada en 15 PBq. Gran parte de los radionúclidos fueron transportados y difundidos hacia el este por la corriente de Kuroshio (Stohl *et al.*, 2012).

Después del desastre nuclear de Fukushima, el gobierno japonés emitió órdenes de evacuación el 12 de marzo de 2011 para un radio de 20 km alrededor de la planta nuclear y en áreas con una dosis anual acumulada de radiación prevista superior a 20 mSv/año. Ocho municipios completos (Iitate, Katsurao, Kawauchi, Namie, Futaba, Okuma, Tomioka y Naraha) fueron designados como zonas de evacuación obligatoria (adicionalmente, la ciudad de Hirono también emitió una orden de evacuación obligatoria) (**Figura 3**). En total, 78.768 residentes fueron obligados a evacuar (Morita, Ando y Ohtsu, 2019).

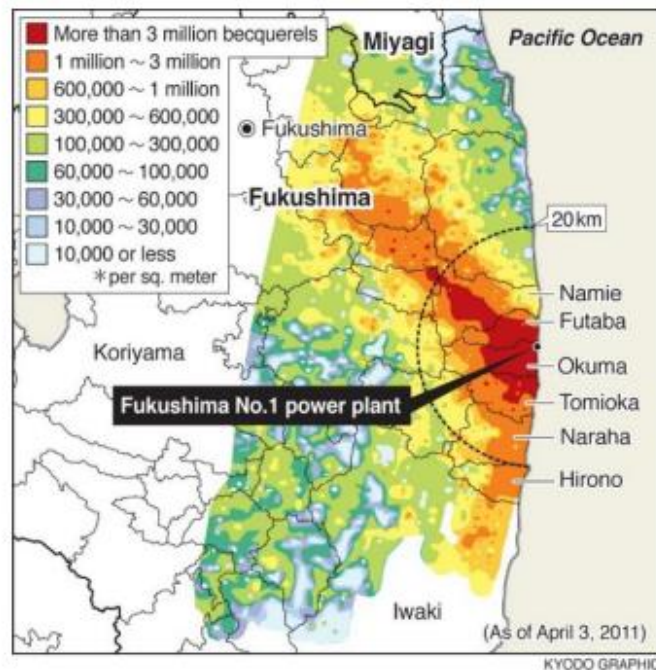


**Figura 3.** Mapas de la de la región de Tohoku (noreste) de Japón y las áreas de evacuación en la prefectura de Fukushima. Donde se muestran los ocho municipios designados como áreas de evacuación obligatoria por el gobierno nacional (Iitate, Katsurao, Kawauchi, Namie, Futaba, Okuma, Tomioka y Naraha). Posteriormente, Hirono y los 3 municipios de Minamisoma, Tamura y Kawamata (no representados). (Adaptado de Morita, Ando y Ohtsu, 2019).

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

Este accidente nuclear resultó en la emisión de radionucleidos al medio ambiente, principalmente a la atmósfera y el océano Pacífico Norte. Las evaluaciones indican que la mayoría de estos radionucleidos, como el  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  y  $^{137}\text{Cs}$ , fueron transportados por los vientos hacia el este y depositados en el océano, mientras que un pequeño porcentaje se depositó en la tierra, principalmente hacia el noroeste de la planta. Además de la deposición atmosférica, hubo emisiones líquidas directas al mar desde la central nuclear (IAEA, 2015). Las estimaciones indican que se liberaron entre 6.000 y 12.000 PBq de  $^{133}\text{Xe}$ , entre 100 y 400 PBq de  $^{131}\text{I}$ , y entre 7 y 20 PBq de  $^{137}\text{Cs}$  a la atmósfera, con emisiones adicionales de 10 a 20 PBq de  $^{131}\text{I}$  y 1 a 6 PBq de  $^{137}\text{Cs}$  directamente al océano. Estos radionucleidos fueron encontrados en agua potable, alimentos y productos no comestibles, lo que llevó a restricciones de consumo humano de estos recursos, incluyendo un límite máximo de 100 Bq/kg para los productos pesqueros (Hayami *et al.*, 2014; IAEA, 1991, 1996a, 2005; Japan Ministry of Agriculture, 2012).

La Figura 4 muestra un mapa de la distribución de la radioactividad liberada tras el desastre de Fukushima.

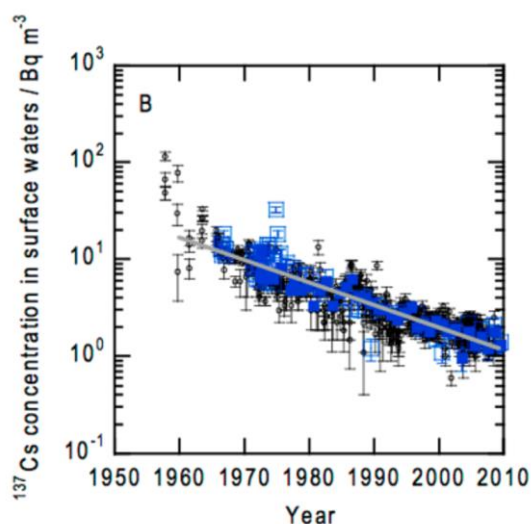


**Figura 4.** Mapa de la distribución de la radioactividad liberada tras el desastre de Fukushima (Adaptado de Kinoshita *et al.*, 2011).

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### 1.3. ANTECEDENTES

Previo al accidente nuclear de Fukushima de 2011, la zona ya había experimentado cambios en los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  en el agua de mar. A principios de la década de 1960 la principal fuente de Cs fue la precipitación global debido a las pruebas nucleares atmosféricas a gran escala, donde los niveles en la región de Japón se encontraban en torno a  $10 \text{ Bq m}^{-3}$ . A partir de los años 70 se observa una disminución gradual de la concentración tras el cese de muchas pruebas nucleares, sin embargo, no fue hasta 1986 cuando los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  aumentaron de nuevo debido al accidente de Chernóbil. De los años 90 hasta 2010 disminuye la concentración del Cs debido a la desintegración radiactiva y los procesos de dispersión y dilución. Por lo que, los niveles de concentración, a excepción del año 1986, muestran una tendencia decreciente llegando a un promedio de  $1.5 \text{ Bq m}^{-3}$  en el año 2010 (Povinec, Hirose y Aoyama, 2012; IAEA, 2015), tal como se muestra en la Figura 5.

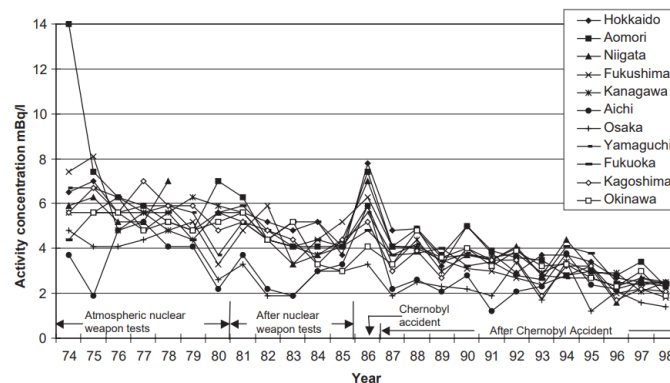


**Figura 5.** Evolución de la concentración de  $^{137}\text{Cs}$  en el agua de mar en la región de Japón desde la década de 1960 hasta 2010, mostrando los picos debido a las pruebas nucleares atmosféricas y el accidente de Chernóbil (Adaptado de Povinec, Hirose y Aoyama, 2012)

Al centrarse en el pico significativo producido por el accidente de Chernóbil, un estudio realizado por Ikeuchi, (2003) comprobó los niveles de concentración de actividad de  $^{137}\text{Cs}$ , medido en milibecquerels por litro (mBq/L), en varias regiones de Japón, incluida Fukushima. En la **Figura 6** se destacan las concentraciones de actividad del  $^{137}\text{Cs}$  durante el periodo de 1974-1998. Se observan altas concentraciones de actividad durante 1974-1980 debido a las continuas pruebas nucleares atmosféricas realizadas por China. Tras el cese de las pruebas, se observa una disminución en la concentración de actividad del isótopo hasta 1986, cuando el accidente de Chernóbil provocó un pico significativo de la actividad, similar al observado en la Figura 5.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

Después del pico, la actividad del  $^{137}\text{Cs}$  volvió a disminuir gradualmente, reflejando la desintegración radiactiva y la dilución en el medio ambiente marino



**Figura 6.** Niveles de la concentración de actividad de  $^{137}\text{Cs}$  durante el periodo de 1974-1998 en Japón, cuyos incrementos se destacan por las pruebas nucleares de China y el accidente de Chernóbil, y la posterior disminución debido a la desintegración radiactiva y la dilución en el medio ambiente marino (Adaptado de Ikeuchi, 2003).

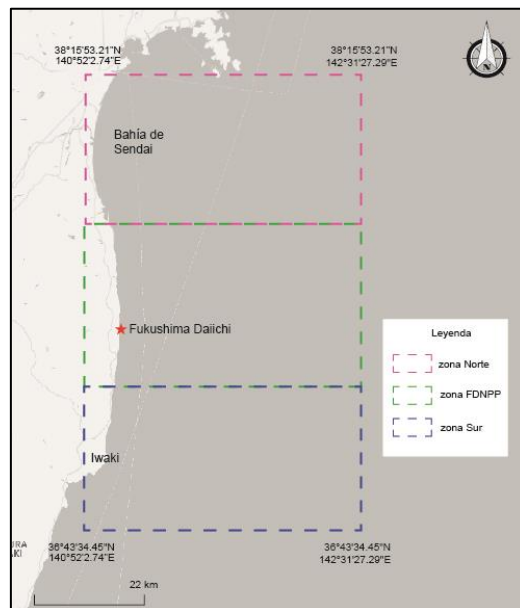
### 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Después del desastre de Fukushima en 2011, el  $^{137}\text{Cs}$  emergió como uno de los radionucleidos más significativos liberados en el ecosistema marino. Su transporte y distribución en el medio ambiente acuático resultaron en su acumulación tanto en componentes bióticos como abióticos. La vida media prolongada del  $^{137}\text{Cs}$ , aproximadamente 30,17 años, subraya su persistencia y potencial para bioacumularse y biomagnificarse a través de las cadenas tróficas marinas. Esta capacidad plantea preocupaciones sobre los efectos a largo plazo en la biota marina.

En la literatura existe una potencial fuente de información sobre los radionucleidos liberados tras el desastre de Fukushima, destacando un mayor número de artículos en lo referente al  $^{137}\text{Cs}$ . Sin embargo, hay una notable escasez de información sobre su comportamiento específico en las cadenas tróficas marinas. Esta laguna señala la importancia de realizar investigaciones que aborden cómo el  $^{137}\text{Cs}$  se acumula y se transfiere a través de diferentes niveles tróficos en los ecosistemas marinos tras el escenario de Fukushima.

En este contexto, se ha definido un área de estudio (Figura 7), donde se han tenido en cuenta las zonas más afectadas tras el accidente, abarcando tres áreas diferenciadas alrededor de la planta nuclear de Fukushima Daiichi, extendiéndose hacia el norte hasta la bahía de Sendai y hacia el sur hasta Iwaki. Estas zonas se identifican como Zona Norte, Zona FDNPP (Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant) y Zona Sur.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.



**Figura 7.** Área de estudio seleccionada para la presente revisión sobre la acumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en el ecosistema marino abarcando tres zonas diferenciadas alrededor de la planta nuclear de Fukushima Daiichi. La Zona Norte (líneas rosas), se extiende hasta la bahía de Sendai. La Zona FDNPP (líneas verdes), incluye el área circundante a la planta nuclear. La Zona Sur (líneas azules), se extiende hacia Iwaki (Fuente: elaboración propia).

## **Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

### **2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de esta revisión es evaluar el impacto a largo plazo del cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) en el ecosistema marino desde el accidente nuclear de Fukushima en 2011 hasta la actualidad.

Para alcanzar dicho objetivo, se han planteado los siguientes objetivos secundarios:

- Estudiar cronológicamente la bioacumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina.
- Estudiar cronológicamente la acumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la abiota marina.
- Investigar el proceso de biomagnificación del  $^{137}\text{Cs}$  en las redes tróficas marinas.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

La presente revisión bibliográfica se llevó a cabo durante un período de dos meses, de abril a junio de 2024. Este análisis documental clásico se centró en los artículos más relevantes sobre el impacto acumulativo del  $^{137}\text{Cs}$  en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima, abarcando desde 2011 hasta 2024. Para ello, se utilizó principalmente la base de datos *Google Scholar*, aunque se consideraron otras opciones como *Pubmed*, *Web of Science* y *ScienceDirect*. Sin embargo, debido a la falta de información específica sobre el tema en estas bases de datos, se limitaron las búsquedas exclusivamente a *Google Scholar*. Las búsquedas se realizaron en inglés para obtener un mayor número de resultados.

*Google Scholar* es una herramienta de búsqueda especializado en literatura académica y recursos educativos, desarrollado por Google. Lanzado en noviembre de 2004, proporciona acceso gratuito a una vasta colección de artículos de revistas, tesis, libros, resúmenes y otros documentos académicos. Su objetivo principal es facilitar el acceso a la información académica y promover la difusión del conocimiento en diversas disciplinas.

Para esta revisión, se definieron tres ecuaciones de búsqueda en función de los tres objetivos secundarios establecidos. Los operadores booleanos empleados y combinado con los términos de búsqueda fueron "AND" y "OR". El operador "AND" exige que ambas palabras conectadas aparezcan en los resultados, mientras que "OR" permite que cualquiera de las palabras conectadas esté presente. Dado que *Google Scholar* automatiza el uso del operador booleano "AND" en los términos de búsqueda, no fue necesario especificarlo en las ecuaciones, ya que el propio programa lo aplica automáticamente.

Para la primera ecuación de búsqueda (Figura 8), correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio cronológico de la bioacumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina, fueron considerados los siguientes términos de búsqueda: *Radionuclides*, *marine biota*, *after Fukushima disaster*, *Cesium-137*, *Ocean*, *Accumulation*, *Bioaccumulation* y *Coast of Fukushima*.

En cuanto a los criterios de inclusión, los artículos seleccionados para la primera ecuación de búsqueda debían cumplir con los siguientes requisitos:

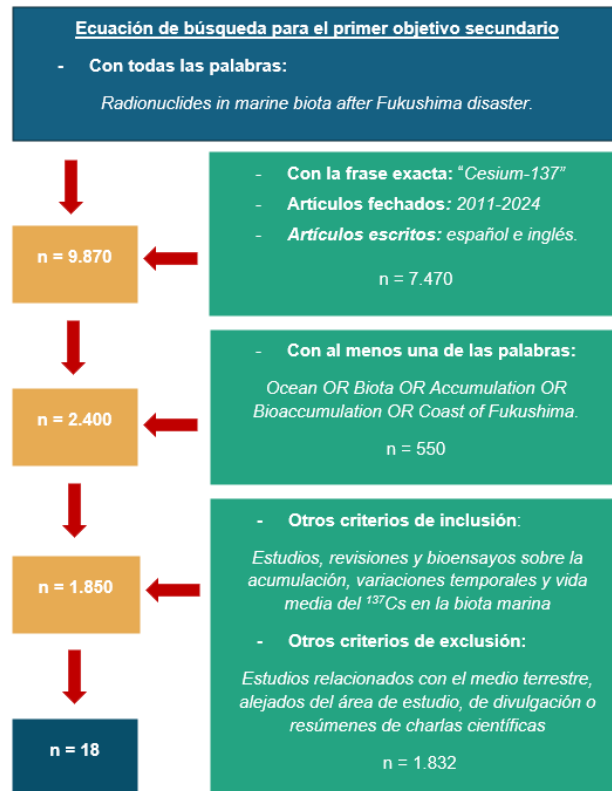
- Estudios, bioensayos y revisiones sobre la acumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina tras el desastre de Fukushima.
- Artículos publicados desde 2011 hasta la actualidad.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

- Artículos escritos en inglés o en castellano.
- Artículos circunscritos al área de estudio seleccionada.
- Artículos que relacionaban la vida media y las variaciones temporales de la concentración del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina.

Asimismo, se excluyeron los artículos que:

- Fueran publicados antes de 2011.
- Estuvieran relacionados con el medio terrestre.
- Se alejaran del área de estudio.
- Estuvieran escritos en un idioma distinto al inglés o castellano.
- Fueran artículos de divulgación o resúmenes de charlas científicas.



**Figura 8.** Diagrama de flujo de la primera ecuación de búsqueda correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio cronológico de la bioacumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina, aplicando los criterios de inclusión y exclusión.

Para la segunda ecuación de búsqueda (Figura 9), correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio cronológico de la acumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la abiota marina, fueron considerados los siguientes términos de búsqueda: *Radionuclides, Marine Ecosystem, After Fukushima Disaster, Cesium-137, Seawater, Sediments, Acculation y Coast of Fukushima.*

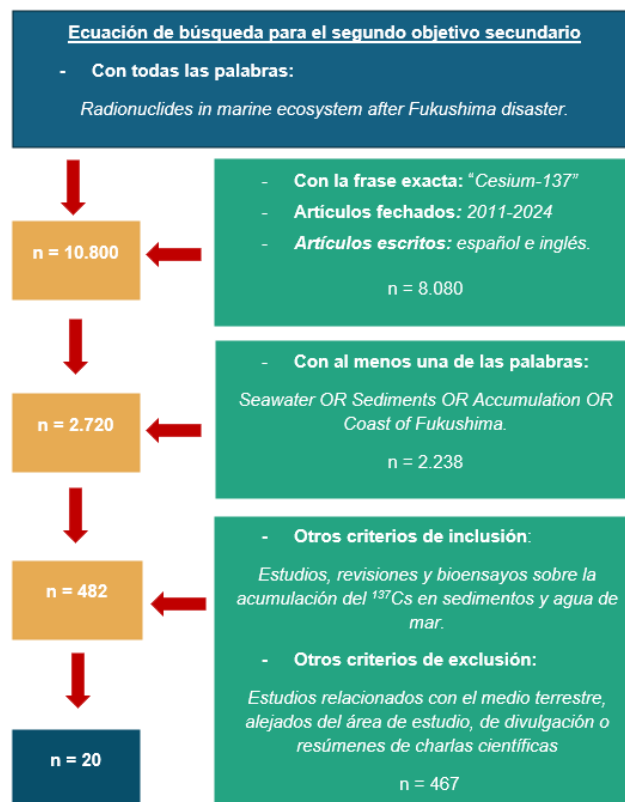
## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

En cuanto a los criterios de inclusión, los artículos seleccionados para en la segunda ecuación de búsqueda debían cumplir con los siguientes requisitos:

- Estudios, bioensayos y revisiones sobre la acumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina (sedimentos y agua de mar) tras el desastre de Fukushima.
- Artículos publicados desde 2011 hasta la actualidad.
- Artículos escritos en inglés o en castellano.
- Artículos circunscritos al área de estudio seleccionada.

Asimismo, se excluyeron los artículos que:

- Fueran publicados antes de 2011.
- Estuvieran relacionados con el medio terrestre.
- Se alejaran del área de estudio.
- Estuvieran escritos en un idioma distinto al inglés o castellano.
- Fueran artículos de divulgación o resúmenes de charlas científicas.



**Figura 9.** Diagrama de flujo de la segunda ecuación de búsqueda correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio cronológico de la acumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina, aplicando los criterios de inclusión y exclusión.

Finalmente, para la tercera ecuación de búsqueda (Figura 10), correspondiente al objetivo secundario sobre el proceso de biomagnificación del  $^{137}\text{Cs}$  en el ecosistema marino de Fukushima, fueron considerados los siguientes términos de búsqueda:

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

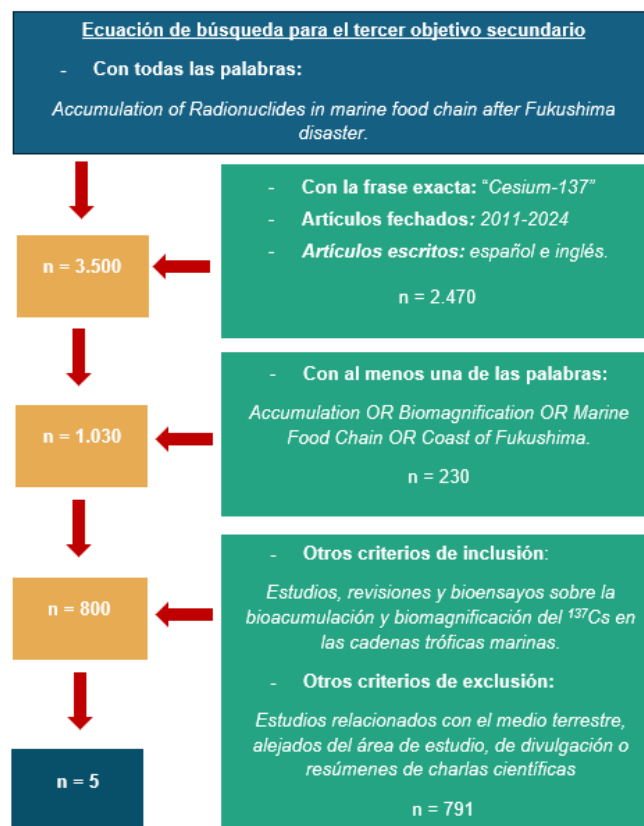
*Accumulation, Radionuclides, Marine Food Chain, After Fukushima Disaster, Cesium-137, Biomagnification y Coast of Fukushima.*

Continuando con los criterios de inclusión, los artículos seleccionados para en la tercera ecuación de búsqueda debían cumplir con los siguientes requisitos:

- Estudios, bioensayos y revisiones sobre la bioacumulación o biomagnificación del <sup>137</sup>Cs en las cadenas tróficas marinas tras el desastre de Fukushima.
- Artículos publicados desde 2011 hasta la actualidad.
- Artículos escritos en inglés o en castellano.
- Artículos circunscritos al área de estudio seleccionada.

Por último, se excluyeron los artículos que:

- Fueran publicados antes de 2011.
- Estuvieran relacionados con el medio terrestre.
- Se alejaran del área de estudio.
- Estuvieran escritos en un idioma distinto al inglés o castellano.
- Fueran artículos de divulgación o resúmenes de charlas científicas.



**Figura 10.** Diagrama de flujo de la tercera ecuación de búsqueda correspondiente al objetivo secundario sobre el estudio de la biomagnificación del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino de Fukushima, aplicando los criterios de inclusión y exclusión.

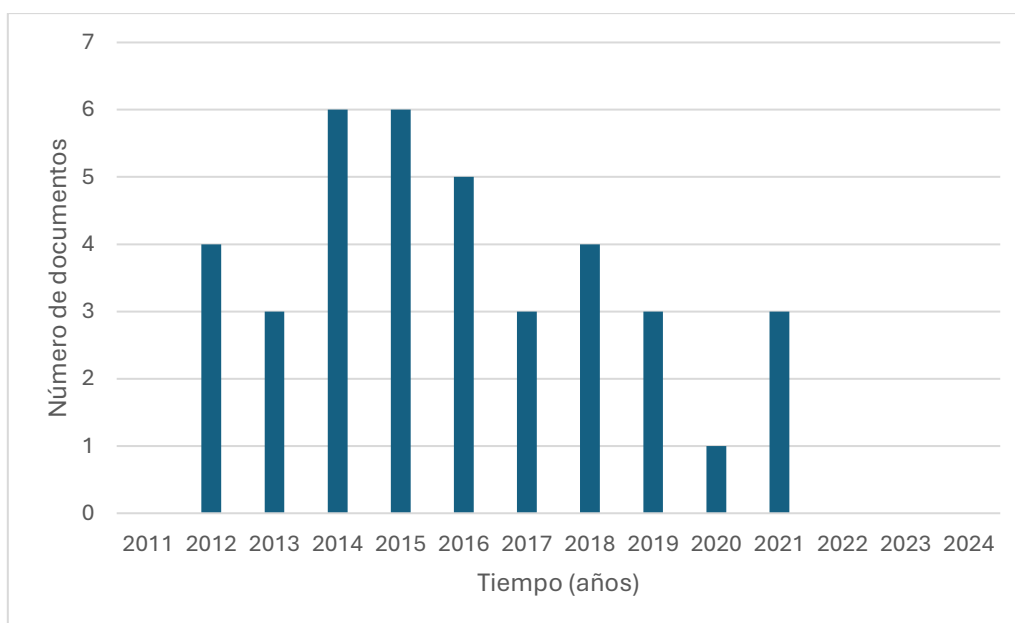
## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

Tras los resultados de las ecuaciones de búsqueda, se han adquirido un total de 38 documentos, siendo 18 los documentos utilizados para el estudio cronológico de la bioacumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina, 20 en el estudio de la acumulación de la abiota marina y 5 para el proceso de biomagnificación en las redes tróficas marinas, dentro de los cuales, 5 han sido utilizados en más de un objetivo secundario.

La distribución anual de los documentos utilizados se muestra en la Figura 11. Esta figura representa el número total de documentos sobre el impacto acumulativo del  $^{137}\text{Cs}$  obtenido después del acontecimiento de Fukushima en función del tiempo en años, desde 2011 hasta la actualidad.



**Figura 11.** Distribución anual del número de artículos publicados sobre el impacto del cesio-137 después del accidente de Fukushima, obtenidos tras la búsqueda bibliográfica.

En el Anexo I, se presentan la Tabla I. 1, Tabla I. 2 y Tabla I. 3, las cuales recogen los documentos utilizados en la revisión, ordenados para cada uno de los objetivos secundarios, donde se especifica el título, tipo de documento (artículo de revisión, experimental, capítulo de libro o informe), autores, año de publicación y tipo de publicación (revista, libro o informe). Tras la revisión, se identificaron un total de 27 artículos experimentales, 4 artículos de revisión bibliográfica, 4 informes y 3 capítulos de libros.

## **Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

Los documentos utilizados en la elaboración de esta revisión bibliográfica se obtuvieron con el fin de responder al objetivo principal de estudiar la variabilidad temporal de la acumulación de  $^{137}\text{Cs}$  en el ecosistema marino.

En este sentido, la Figura 11 muestra un incremento en las publicaciones para los años 2015 y 2016. Esto puede deberse a una mayor disponibilidad de datos y estudios relacionados con el evento de Fukushima, ya que la mayoría de los estudios publicados en ese periodo fueron cronológicos, analizando la acumulación de  $^{137}\text{Cs}$  en el ecosistema marino desde 2011. A partir de entonces, se observa una tendencia hacia una disminución gradual en las publicaciones en años posteriores, por ello, no se observan documentos para los años 2022, 2023 y 2024.

Esta disminución puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, la búsqueda de artículos recientes sobre la biota y abiota revela una escasez de publicaciones para los últimos años. Además, la mayoría de estos artículos son de acceso privado, lo que impide su disposición. En segundo lugar, la concentración del radioisótopo en el agua de mar, sedimentos y organismos marinos en el área de Fukushima ha ido disminuyendo hacia niveles inferiores al límite máximo establecido en Japón (100 Bq/Kg), reduciendo la necesidad de nuevos estudios en esta área (AEA Environment Laboratories, 2016).

### **4.2. ESTUDIO CRONOLÓGICO DE LA BIOACUMULACIÓN DEL $^{137}\text{Cs}$ EN LA BIOTA MARINA**

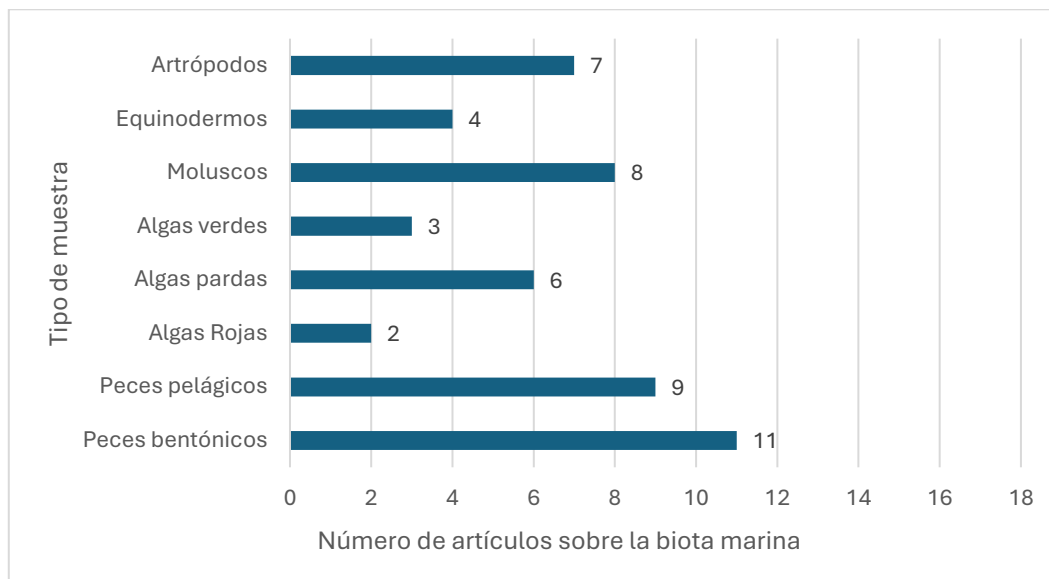
Con el propósito de estudiar la bioacumulación temporal del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina, se revisaron e incluyeron un total de 18 artículos, seleccionados en función del área de estudio. Esta área comprendió tres zonas, la región de Fukushima como punto central, la zona del norte hasta la bahía de Sendai y la zona del sur hasta la zona de Iwaki.

De los 18 artículos, se extrajeron los datos correspondientes a concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  (en Bq/Kg) en diferentes organismos marinos. Estos organismos se clasificaron en peces pelágicos, peces bentónicos, algas rojas, pardas y verdes, así como animales invertebrados, incluyendo moluscos, equinodermos y artrópodos. La Figura 12 muestra la frecuencia de aparición de cada tipo de muestra en los artículos revisados.

En este contexto, los peces bentónicos fueron los más mencionados, apareciendo en 11 de los 18 artículos, lo que representa el 61,11% del total. Los peces pelágicos se mencionaron en 9 artículos, es decir, en el 50% de los casos. Por último, las algas

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

rojas fueron las menos mencionadas, apareciendo en solo 2 de los 18 artículos, representando un 11,11% del total.



**Figura 12.** Frecuencia de aparición de muestras de peces (pelágicos y bentónicos), algas (rojas, verdes y pardas) y animales invertebrados (moluscos, equinodermos y artrópodos) en los artículos seleccionados para el estudio de la biota marina.

Para cada tipo de muestra, se identificaron las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en las zonas de estudio (Norte, Fukushima y Sur), calculando promedios a partir de los datos recogidos de documentos oficiales y estudios de campo.

Cabe destacar que, a partir de 2016, los datos obtenidos en los estudios mostraron concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  tan bajas que se consideran no detectables, o bien, los estudios fueron muy escasos. Por esta razón, el análisis cronológico desde 2011 hasta la actualidad se acotó al periodo de 2011 a 2016. Los resultados de los promedios de las concentraciones para este periodo de tiempo se muestran en el Anexo I en la Tabla I. 4.

En el área de Fukushima, los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  en peces pelágicos aumentaron significativamente en 2012, alcanzando 109 Bq/kg, pero disminuyeron en los años siguientes, llegando a 12,3 Bq/kg en 2016. En el norte, las concentraciones fueron más estables, pero también mostraron una disminución gradual, de 24,8 Bq/kg en 2011 a 1,63 Bq/kg en 2016. En la zona sur, aunque los datos son más limitados, se observa una tendencia similar, con un pico en 2012 y una posterior reducción hasta no ser detectables en 2016. Para los peces bentónicos, las concentraciones en Fukushima alcanzaron un máximo de 114 Bq/kg en 2012 y luego disminuyeron a 14,5 Bq/kg en 2016. En el norte y sur, las concentraciones también disminuyeron, reflejando una tendencia similar a la observada en los peces pelágicos.

## **Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

Los resultados obtenidos en los peces pelágicos del área de Fukushima muestran que los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  se incrementaron significativamente tras el desastre de la central nuclear Fukushima Daiichi, debido a la dispersión inicial del radioisótopo en el medio marino. En los años posteriores, los niveles disminuyen de manera gradual. En el norte, las concentraciones presentan una tendencia más estable pero decreciente, y en el sur, aunque los datos son más limitados, se observa un pico en 2012 y otro en 2014, este último posiblemente atribuido a una fuga de agua contaminada proveniente del reactor (Kanda, 2013).

Para los peces bentónicos, las concentraciones en Fukushima alcanzan niveles superiores en 2012 en comparación con los peces pelágicos. Este incremento sugiere que el menor desplazamiento de estas especies, junto con el contacto continuo con el sedimento, favorece una mayor concentración del isótopo. En 2016, los valores descienden, reflejando un patrón de reducción en la bioacumulación del radioisótopo con el tiempo, similar al observado en los peces pelágicos. En las áreas norte y sur, las concentraciones también disminuyen, mostrando una tendencia similar.

Continuando con los resultados de las algas rojas, verdes y pardas muestran una disminución marcada en los niveles de este radioisótopo con el tiempo.

En las algas rojas, las concentraciones iniciales fueron significativamente altas en el norte (121 Bq/kg) y Fukushima (182 Bq/kg), pero disminuyeron a niveles no detectables en los años siguientes. En el sur, aunque los niveles iniciales no fueron detectados en 2011, se observó una disminución constante desde 10,5 Bq/kg en 2012 a niveles casi no detectables en 2015. Para las algas verdes, las concentraciones fueron extremadamente altas en Fukushima (2010 Bq/kg) en 2011, disminuyendo notablemente en los años siguientes hasta ser no detectables. En el norte, las algas verdes presentaron una concentración inicial de 157 Bq/kg, pero en los años siguientes no fueron detectables. Las algas pardas mostraron una tendencia similar, con niveles altos en Fukushima (758 Bq/kg) en 2011, que disminuyeron a niveles no detectables en los años posteriores. En el sur, las concentraciones iniciales de 282 Bq/kg en 2011 disminuyeron gradualmente hasta no ser detectables en 2016.

Los niveles iniciales elevados en los primeros años se atribuyen al desastre de Fukushima. Sin embargo, la disminución observada en los años siguientes puede explicarse por el proceso de eliminación y el decrecimiento natural de la concentración del radioisótopo con el tiempo, a medida que el cesio se diluye y se desintegra radiactivamente en el entorno marino.

## **Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

Por último, las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en moluscos, equinodermos y artrópodos muestran patrones interesantes tras el desastre de Fukushima. En los moluscos, los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  fueron no detectables en el norte durante todo el periodo de estudio. En Fukushima, se detectaron concentraciones de 28,5 Bq/kg en 2011, pero no se detectaron en los años siguientes, excepto un pico en 2014 de 7,67 Bq/kg, posiblemente asociado a la fuga del año anterior. En el sur, los niveles fueron no detectables la mayoría de los años, con excepciones en 2013 (0,00263 Bq/kg) y un notable incremento a 7,02 Bq/kg en 2015, indicando posible variabilidad en la bioacumulación.

Para los equinodermos, los datos muestran concentraciones no detectables en el norte excepto en 2012 (5,17 Bq/kg), mientras que en Fukushima se observaron altos niveles en 2011 (107 Bq/kg) que disminuyeron gradualmente hasta no ser detectables. En el sur, se detectaron niveles en 2012 (6,89 Bq/kg) y un pico en 2013 (10,1 Bq/kg), seguido de una rápida disminución. Estos resultados podrían indicar que los equinodermos en el área de Fukushima estuvieron expuestos directamente a la contaminación y, posteriormente, experimentaron una disminución gradual del  $^{137}\text{Cs}$ , posiblemente debido a procesos de eliminación biológica y dilución ambiental.

En los artrópodos, las concentraciones fueron generalmente bajas o no detectables, con un pico en Fukushima en 2014 (15 Bq/kg). Esto sugiere una baja bioacumulación en estos organismos, con algunas excepciones posiblemente debidas a exposiciones puntuales.

### **4.3. ESTUDIO CRONOLÓGICO DE LA ACUMULACIÓN DEL $^{137}\text{Cs}$ EN LA ABIOTA MARINA**

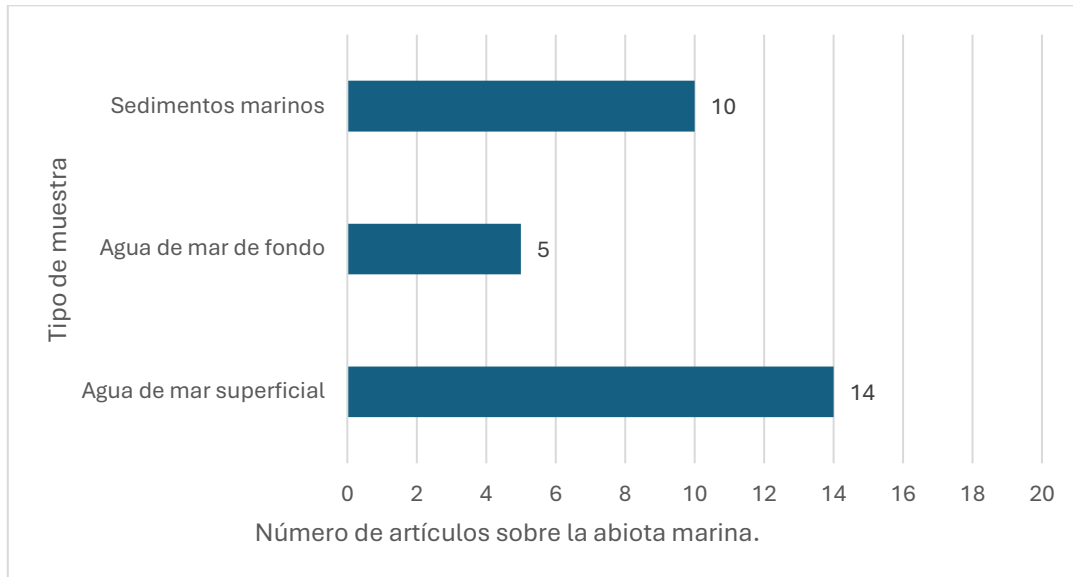
Continuando con el análisis de la acumulación temporal del  $^{137}\text{Cs}$  en la abiota marina, se revisaron e incluyeron un total de 20 artículos, seleccionados en función del área de estudio previamente descrita.

De igual modo, fueron obtenidos los datos correspondientes a concentraciones de  $^{137}\text{C}$  (en Bq/Kg) en diferentes muestras abióticas marinas. Estas muestras se clasificaron en agua superficial, agua de fondo y sedimentos marinos. La Figura 13 muestra la frecuencia de aparición de cada tipo de muestra en los artículos revisados.

En lo que respecta a la frecuencia de aparición, el agua superficial fue la más mencionada, apareciendo en 14 de los 20 artículos, lo que representa el 70% del total. Los sedimentos marinos se mencionaron en 10 artículos, es decir, en el 50% de los

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

casos. Por último, el agua de fondo marina fue la menos mencionada, apareciendo en solo 5 de los 20 artículos, representando un 25% del total.



**Figura 13.** Frecuencia de aparición de las muestras de agua superficial, de fondo y sedimentos marinos en los artículos seleccionados para la abiota marina.

Al igual que en el análisis de la biota marina, se llevaron a cabo promedios de las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en agua superficial, agua de fondo y sedimentos marinos en las tres áreas de estudio. Se observó que, a partir de 2016, los datos mostraron concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  tan bajas que se consideran no detectables, o bien, los estudios fueron muy escasos. Por esta razón, el análisis cronológico para la abiota se acotó al periodo de 2011 a 2016. Los resultados de los promedios de las concentraciones para este periodo de tiempo se muestran en el Anexo I en la Tabla I. 5.

En el agua de mar superficial, las concentraciones del radioisótopo fueron más altas cerca de la planta de Fukushima (FDNPP) en 2011, con un valor de 6.020 Bq/kg, que disminuyó drásticamente a niveles no detectables en 2016. Este incremento está relacionado con la liberación inicial del radioisótopo tras el desastre al ecosistema marino. En el norte, las concentraciones aumentaron de 0,99 Bq/kg en 2011 a un máximo de 65,5 Bq/kg en 2014, antes de disminuir a niveles no detectables en 2016 (Horiguchi *et al.*, 2018). El pico en 2014 se relaciona con la fuga de agua contaminada por parte de TEPCO. En el sur, las concentraciones también mostraron un aumento, alcanzando un máximo de 69,6 Bq/kg en 2014 y permaneciendo relativamente altos en 2015 y 2016, con 34,6 Bq/kg en este último año.

Para el agua de mar de fondo, los niveles fueron generalmente más bajos en comparación con el agua superficial. En el norte, las concentraciones fueron no

## **Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

detectables en 2011, aumentando a 46,8 Bq/kg en 2015 antes de disminuir ligeramente a 39,6 Bq/kg en 2016. En la planta de Fukushima, los niveles también fueron no detectables en 2011, alcanzando un pico de 64,9 Bq/kg en 2014 y disminuyendo a niveles no detectables en 2016. En el sur, los niveles alcanzaron 41 Bq/kg en 2014 antes de disminuir a niveles no detectables en 2016.

Por último, en el sedimento marino, las concentraciones del isótopo en el norte no fueron detectables en 2011, pero en 2013 se observa un aumento a 21,7 Bq/kg antes de disminuir gradualmente a 3,11 Bq/kg en 2016. En la planta de Fukushima (FDNPP), las concentraciones también comenzaron siendo no detectables en 2011, pero aumentaron a 8,99 Bq/kg en 2013, manteniéndose relativamente estables con ligeras variaciones entre 6,59 y 7,45 Bq/kg hasta 2016. En la zona sur, se observó una tendencia diferente, con concentraciones no detectables en 2011, seguidas de un aumento considerable a 31,5 Bq/kg en 2013 y un pico de 78 Bq/kg en 2016.

Los sedimentos marinos mostraron una disminución más lenta y una mayor persistencia del isótopo. En la zona sur, los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  en 2012 fueron mayores que en las otras dos áreas y aumentaron progresivamente, alcanzando las concentraciones más altas en 2016, lo que sugiere una mayor retención del isótopo por estos sedimentos. Tanto en el norte como en Fukushima, los niveles alcanzaron sus máximos en 2013 y luego mostraron una tendencia más estable.

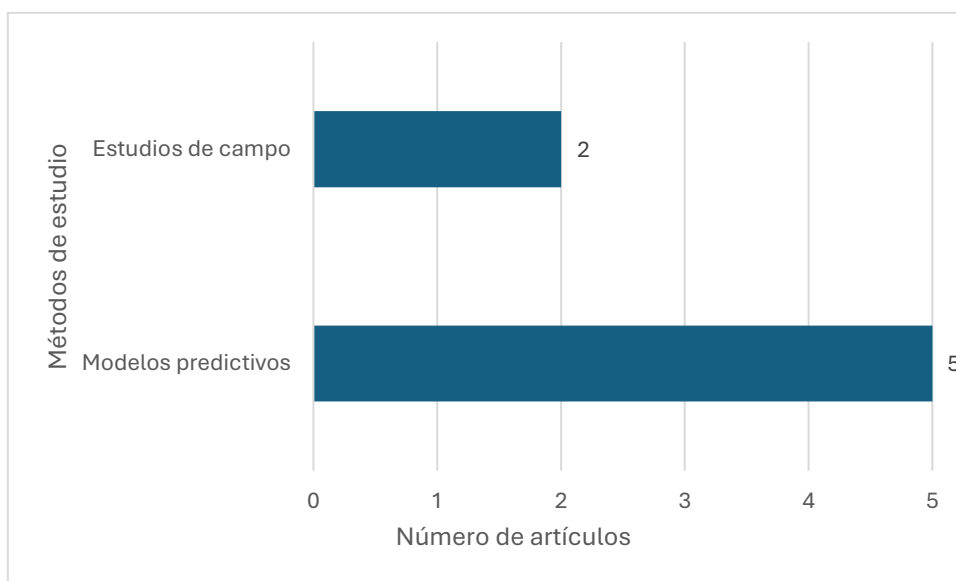
### **4.4. ESTUDIO DEL PROCESO DE BIOMAGNIFICACIÓN DEL $^{137}\text{Cs}$ EN LAS CADENAS TRÓFICAS MARINAS**

Para comprender la dinámica de bioacumulación y biomagnificación del  $^{137}\text{Cs}$  en las cadenas tróficas marinas, se han revisados un total de 5 artículos. Estos artículos abordan diferentes modos de estudio de la integración del  $^{137}\text{Cs}$  en las cadenas alimentarias marinas, englobando modelos de predicciones y estudios de campo.

En la Figura 14, se presenta la frecuencia de aparición entre modelos de predicciones y toma de datos experimentales en el campo, utilizados en los artículos revisados.

En cuanto a la frecuencia de aparición, los artículos que utilizaron modelos de predicción fueron los más comunes, apareciendo en 5 de los 5 artículos revisados, lo que representa el 100%. Los artículos basados en la toma de datos experimentales en el campo se mencionaron en 2 artículos, es decir, en el 40% de los casos.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.



**Figura 14.** Frecuencia de aparición de los artículos que utilizan modelos de predicción y toma de datos experimentales en campo para el estudio del proceso de biomagnificación en las cadenas tróficas marinas.

En el estudio de Rowan *et al.*, (2015), se exploró la acumulación del  $^{137}\text{Cs}$  en la especie *Thunnus alalunga*, (Bonnaterre, 1788) (albacora), utilizando un modelo bioenergético para evaluar la relación entre las tasas de consumo de alimento y las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$ . Las tasas de consumo variaron de 0,0261 g de alimento/g de masa corporal/día para individuos de 3+ a 4+ años y 0,0296 g de alimento/g de masa corporal/día para los de 4+ a 5+ años.

Las albacoras que migraban a través de la Ruta Transpacífica interactuaron repetidamente con la pluma de contaminación de Fukushima, resultando en concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  que alcanzaron niveles tres veces superiores a las no impactadas, mientras que las que siguieron la Ruta Norte-Costa-Norte mostraron concentraciones del doble de los niveles pre-Fukushima. Por lo tanto, puede evidenciarse que el patrón de migración es un factor a tener en cuenta en la exposición a las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$ .

Asimismo, se realizaron cálculos de estado estacionario, utilizando un factor de bioacumulación de 161 L/kg resultaron en concentraciones predichas de 0,242 Bq/kg en peso húmedo para albacoras pre-Fukushima, comparados con niveles observados de 0,177 Bq/kg. Para las albacoras transpacíficas, las concentraciones predichas de 0,586 Bq/kg concuerdan con las predicciones biocinéticas, con niveles máximos observados de 0,768 Bq/kg (Neville *et al.*, 2014), por debajo del umbral de seguridad para consumidores humanos (100 a 1.000 Bq/kg).

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

Continuando en esta línea, Tateda *et al.*, (2015) emplearon un modelo de aproximación en potencia para estudiar la transferencia del  $^{137}\text{Cs}$  a través de la cadena trófica del lenguado de oliva (*Paralichthys olivaceus*, Temminck y Schlegel, 1846). En este contexto, se reconstruyeron las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en el agua superficial en áreas cercanas y alejadas de la central nuclear de Fukushima Daiichi, simulando la bioacumulación de especies piscívoras y planctívoras, siendo estas el principal alimento del lenguado.

Las concentraciones máximas de  $^{137}\text{Cs}$  en el agua superficial cercana a Fukushima alcanzaron 2.000 Bq/L, mientras que en áreas más distantes variaron entre 0,1 y 10 Bq/L (valores medidos en el área). Las macroalgas y bivalvos presentaron valores de hasta 100 Bq/kg en áreas cercanas a Fukushima, mostrando una clara correlación con las concentraciones en el agua superficial. Lo que implican que, mientras más alta es la concentración de  $^{137}\text{Cs}$  en el agua, mayor es la concentración que se puede esperar en la biota sedentaria, reflejando un factor de transferencia proporcional a la disponibilidad del radiocesio en el ambiente acuático.

Todo esto sugiere que las cadenas tróficas pueden amplificar la concentración de radiocesio a niveles que podrían representar un riesgo para los consumidores humanos de pescado y mariscos, especialmente en zonas cercanas a la contaminación radiactiva.

Por otro lado, Arakawa *et al.*, (2015) documentaron la transferencia de  $^{137}\text{Cs}$  a través de relaciones presa-depredador en entornos marinos entre 2012 y 2013. Se registraron concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en peces en sustratos arenosos y arrecifes rocosos al sur de Fukushima, con niveles de 92-212 Bq/kg, 58–109 Bq/kg y 28-79 Bq/kg, 30–79 Bq/kg, respectivamente. Los moluscos como pulpos y calamares no mostraron concentraciones detectables de  $^{137}\text{Cs}$ , mientras que esponjas y erizos de mar exhibieron niveles superiores a 100 Bq/kg. En el caso de las algas, las concentraciones más altas se encontraron en las algas rojas, con niveles de 10,4 Bq/kg y 11,4 Bq/kg. Estos datos complementan los hallazgos de Tateda *et al.*, (2015), mostrando variabilidad según el tipo de sustrato y el movimiento de las especies.

La variación en las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  entre los peces de sustratos arenosos y los de arrecifes rocosos muestra cómo el hábitat afecta la exposición al cesio, posiblemente debido a diferencias en la composición del sedimento y su capacidad para retener radiocesio. Por otro lado, la movilidad de especies como los moluscos (pulpos y calamares), en los cuales no se detecta  $^{137}\text{Cs}$ , sugiere una interacción menor o una exposición más breve con las fuentes contaminantes, probablemente debido a

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

sus patrones de movimiento y a una menor dependencia de los sedimentos contaminados como fuente de alimento. En contraste, las especies sedentarias, que superaron el límite de 100 Bq/kg, evidencian una fuerte bioacumulación debido a su contacto continuo y directo con el sedimento contaminado. La distribución de  $^{137}\text{Cs}$  en las algas muestran una mayor acumulación en algas rojas respecto a otras especies, lo que podría indicar diferencias en la asimilación del  $^{137}\text{Cs}$  entre las especies de algas.

De manera similar, Alava y Gobas, (2016) utilizaron un modelo dinámico de cadena alimentaria en el estudio del proceso de biomagnificación  $^{137}\text{Cs}$  en orcas residentes (*Orcinus orca*, Linneo 1758) y peces grandes como el salmón del Pacífico (*Oncorhynchus spp.*) y el bacalao negro (*Anoplopoma fimbria*, Pallas, 1814) tras el desastre de Fukushima. Encontraron concentraciones de 2 Bq/kg en orcas, 1,6 Bq/kg en el salmón del Pacífico y 0,9 Bq/kg en el bacalao negro, mientras que invertebrados y peces pequeños alcanzaron niveles de 0,05 Bq/kg. Las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  fueron significativamente mayores en organismos bentónicos cercanos a Fukushima debido a altas concentraciones en los sedimentos, alcanzando hasta 100 Bq/kg en peces demersales en áreas altamente contaminadas.

Esta situación refleja una incorporación rápida en la dieta en organismos de niveles tróficos inferiores y tasas de eliminación más lentas en organismos superiores. Además, las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  son significativamente mayores en organismos bentónicos cercanos a Fukushima debido a las altas concentraciones en los sedimentos, evidenciando que los sedimentos actúan como un reservorio de  $^{137}\text{Cs}$ , contribuyendo a la bioacumulación en la biota bentónica y, por ende, en la red alimentaria.

Finalmente, en la publicación de Belharet *et al.*, (2019) detallaron la dinámica de biomagnificación del  $^{137}\text{Cs}$  utilizando un modelo radioecológico dinámico. Las tasas de consumo para las especies estudiadas variaron entre 1% y 6% del peso corporal por día. Antes del accidente, las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  oscilaron entre  $0,10 \pm 0,05$  Bq/kg en la sardina japonesa (*Sardinops sagax*, Jenyns, 1842) y  $0,49 \pm 0,25$  Bq/kg en el atún de aleta amarilla (*Thunnus albacares*, Bonnaterre, 1788). Después del accidente, las concentraciones máximas variaron entre  $4,7 \pm 1,5$  Bq/kg en sitios alejados y hasta  $238,0 \pm 36,5$  Bq/kg cerca de Fukushima. Las concentraciones se correlacionaron con el peso y el nivel trófico, mostrando una vida media ecológica de 360 a 1.400 días en especies grandes y de 110 a 300 días en especies pequeñas. Las especies pequeñas alcanzaron los niveles pre-accidente en 0,33 a 5,19 años, mientras que las grandes

## **Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.**

necesitaron entre 3,45 y 16 años. Sugiriendo que las especies grandes requieren más tiempo para eliminar el  $^{137}\text{Cs}$ , mostrando una mayor capacidad de biomagnificación en niveles tróficos superiores.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### 5. CONCLUSIONES

De la presente revisión bibliográfica puede concluirse que:

- Los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  en organismos marinos aumentaron significativamente después del desastre de Fukushima y disminuyeron gradualmente en los años posteriores, manteniéndose prácticamente por debajo del límite de 100 Bq/kg.
- A partir de 2016, las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  fueron tan bajas que se consideran no detectables, acotando el presente estudio cronológico.
- Las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  fueron más altas cerca del área de la central nuclear de Fukushima y disminuyeron con la distancia en las áreas norte y sur.
- Las especies bentónicas presentaron mayores niveles de  $^{137}\text{Cs}$  debido a su contacto continuo con sedimentos contaminados.
- Los sedimentos marinos actúan como reservorios de  $^{137}\text{Cs}$ , mostrando una disminución más lenta en comparación con el agua de mar y los organismos marinos.
- Los modelos dinámicos predictivos demostraron ser efectivos para estimar la bioacumulación y biomagnificación de  $^{137}\text{Cs}$  en las cadenas tróficas marinas.

## **6. LÍNEAS FUTURAS**

Durante la elaboración del estudio sobre el impacto acumulativo del cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) en el ecosistema marino, se han identificado áreas que requieren de atención en futuras investigaciones.

- **Monitoreo de especies pelágicas.** Se necesita desarrollar e implementar metodologías avanzadas para el monitoreo de especies pelágicas. Debido a su naturaleza migratoria, estas especies son difíciles de estudiar. Por ello, se sugiere el uso de tecnologías como el marcado satelital y el análisis de isótopos estables para rastrear sus rutas migratorias y correlacionarlas con las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en sus organismos.
- **Programas de monitoreo a largo plazo.** Es fundamental establecer programas de monitoreo a largo plazo para evaluar el impacto continuo y acumulativo del  $^{137}\text{Cs}$  en la biota y abiota marina. Los estudios actuales se concentran principalmente en el periodo inmediatamente posterior al accidente, dejando un vacío en el conocimiento sobre los efectos a largo plazo.
- **Refinamiento de los modelos dinámicos predictivos.** Se requiere de un refinamiento y mejora de los modelos dinámicos predictivos, incorporando variables adicionales como cambios en las corrientes oceánicas, redistribución de sedimentos y variaciones climáticas. Esto permitirá predecir de manera más precisa la dinámica del isótopo en las cadenas tróficas.
- **Estudios sobre la transferencia trófica.** Es necesario aumentar el número de estudios sobre la transferencia trófica del  $^{137}\text{Cs}$  en los organismos marinos, especialmente en aquellos menos estudiados como los arrecifes de coral y las zonas de afloramiento, para comprender mejor la dinámica del  $^{137}\text{Cs}$ .
- **Estudios ecotoxicológicos.** Se deben realizar estudios ecotoxicológicos que evalúen los efectos del  $^{137}\text{Cs}$  en diversas especies marinas. Estos estudios deben incluir análisis de biomarcadores de estrés, cambios en el comportamiento y la reproducción, y alteraciones en la estructura de las comunidades biológicas.
- **Investigar la persistencia del  $^{137}\text{Cs}$  en sedimentos marinos.** Es necesario continuar investigando la persistencia del isótopo en sedimentos marinos, especialmente en zonas donde se ha observado una retención significativa. Esto permitirá entender mejor su papel como reservorio y su impacto a largo plazo en el ecosistema marino.

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### 7. BIBLIOGRAFÍA

- AEA Environment Laboratories. (2016). *Action Plan for Nuclear Safety - Project Marine Monitoring: Confidence Building and Data Quality Assurance. Progress Report. Inter-laboratory comparisons 2014-2015. Determination of radionuclides in seawater, sediment and fish.*
- Alava, J. J., & Gobas, F. A. P. C. (2016). Modeling <sup>137</sup>Cs bioaccumulation in the salmon–resident killer whale food web of the Northeastern Pacific following the Fukushima Nuclear Accident. *Science of The Total Environment*, *544*, 56–67.
- Aono, T., Ito, Y., Sohtome, T., Mizuno, T., Igarashi, S., Kanda, J., & Ishimaru, T. (2014). Observation of Radionuclides in Marine Biota off the Coast of Fukushima Prefecture After TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. In *Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident*. Springer Japan.
- Arakawa, H. (2019). Slower Decrease in Radioactive Concentrations in Some Fish Species After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster. In *Oceanography Challenges to Future Earth*. Springer International Publishing.
- Arakawa, H., Tokai, T., Miyamoto, Y., Akiyama, S., Uchida, K., Matsumoto, A., Narita, M., Myouse, H., Agatsuma, Y., Katayama, S., Aoki, M., Matsumoto, I., & Hirakawa, N. (2015). Distribution of Radioactive Material in Marine Ecosystems Off the Fukushima Coast: Radioactive Cesium Levels in Fukushima Marine Organisms. In *Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-ecosystems*. Springer International Publishing.
- Ashraf, M. A., Akib, S., Maah, Mohd. J., Yusoff, I., & Balkhair, K. S. (2014). Cesium-137: Radio-Chemistry, Fate, and Transport, Remediation, and Future Concerns. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *44*(15), 1740–1793.
- Battle, J. V. i. (2015). Exposures and effects in the marine environment after the Fukushima accident. *Annals of the ICRP*, *44*(1\_suppl), 331–346.
- Bauman, A., Cesar, D., Franic, Z., Kovac, J., Lokobauer, N., Marovic, G., Maracic, M., & Novakovic, M. (1979). *Results of environmental radioactivity measurements in the Republic of Croatia, Annual Reports 1978–1991.*
- Baumann, Z., Casacuberta, N., Baumann, H., Masqué, P., & Fisher, N. S. (2013). Natural and Fukushima-derived radioactivity in macroalgae and mussels along the Japanese shoreline. *Biogeosciences*, *10*(6), 3809–3815.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

- Belharet, M., Charmasson, S., Tsumune, D., Arnaud, M., & Estournel, C. (2019). Numerical modelling of  $^{137}\text{Cs}$  content in the pelagic species of the Japanese Pacific coast following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident using a size-structured food-web model. *PLOS ONE*, *14*(3), e0212616.
- Brenner, D. J., Doll, R., Goodhead, D. T., Hall, E. J., Land, C. E., Little, J. B., Lubin, J. H., Preston, D. L., Preston, R. J., Puskin, J. S., Ron, E., Sachs, R. K., Samet, J. M., Setlow, R. B., & Zaider, M. (2003). Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*(24), 13761–13766.
- Brittain, J. E., Storruste, A., & Larsen, E. (1991). Radiocesium in brown trout (*Salmo trutta*) from a subalpine Lake ecosystem after the chernobyl reactor accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, *14*(3), 181–191.
- Buesseler, K., Dai, M., Aoyama, M., Benitez-Nelson, C., Charmasson, S., Higley, K., Maderich, V., Masqué, P., Morris, P. J., Oughton, D., & Smith, J. N. (2017). Fukushima Daiichi–Derived Radionuclides in the Ocean: Transport, Fate, and Impacts. *Annual Review of Marine Science*, *9*(1), 173–203.
- Buesseler, K. O., Jayne, S. R., Fisher, N. S., Rypina, I. I., Baumann, H., Baumann, Z., Breier, C. F., Douglass, E. M., George, J., Macdonald, A. M., Miyamoto, H., Nishikawa, J., Pike, S. M., & Yoshida, S. (2012). Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(16), 5984–5988.
- Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., & Yamazawa, H. (2011). Preliminary Estimation of Release Amounts of  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere. *Journal of Nuclear Science and Technology*, *48*(7), 1129–1134.
- Cortés, G. (2002). *Aportaciones al estudio de los campos de radiación ionizante ambiental*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya.
- Currie, L. A. (1999). International recommendations offered on analytical detection and quantification concepts and nomenclature<sup>1</sup>“Contribution of the National Institute of Standards and Technology; not subject to copyright”.1. *Analytica Chimica Acta*, *391*(2), 103.

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

- Davée Guimarães, J. R. (1992). Bioaccumulation of <sup>137</sup>Cs and <sup>60</sup>Co by a tropical marine teleost *Epinephelus* sp. *Science of The Total Environment*, 120(3), 205–212.
- DRPHH. (2011). *Irsn Report: Assessment on the 66th Day of Projected External Doses for Population Living in the North-West Fallout Zone of the Fukushima Nuclear Accident*.
- Estournel, C., Bosc, E., Bocquet, M., Ulses, C., Marsaleix, P., Winiarek, V., Osvath, I., Nguyen, C., Duhaut, T., Lyard, F., Michaud, H., & Auclair, F. (2012). Assessment of the amount of cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11).
- Filipović-Vinceković, N., Barišić, D., Mašić, N., & Lulić, S. (1991). Distribution of fallout radionuclides through soil surface layer. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, 148(1), 53–62.
- Fisher, N. S., Beaugelin-Seiller, K., Hinton, T. G., Baumann, Z., Madigan, D. J., & Garnier-Laplace, J. (2013). Evaluation of radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident to marine biota and human consumers of seafood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(26), 10670–10675.
- Franić, Z., Marović, G., Petrinec, B., & Kubelka, D. (2008). *<sup>137</sup>Cs Activity Concentrations in Adriatic Mussels and Musky Octopuses and Dose Assessment*.
- Gray, J. S. (2002). Biomagnification in marine systems: the perspective of an ecologist. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1–12), 46–52.
- Håkanson, L., Andersson, T., & Nilsson, Å. (1989). Caesium-137 in Perch in Swedish Lakes after Chernobyl—Present situation, relationships and trends. *Environmental Pollution*, 58(2–3), 195–212.
- Hayami, H., Igarashi, Y., Kajino, M., Kurihara, O., Kobayashi, T., Maki, T., Masumoto, Y., Morino, Y., Nagai, H., Sekiyama, T., Shibata, T., Takemura, T., Takigawa, M., Tanaka, T., Tsumune, D., Bailly du Bois, P., Bocquet, M., Boust, D., Brovchenko, I., & Yoshida, S. (2014). *A Review of the Model Comparison of Transportation and Deposition of Radioactive Materials Released to the Environment as a Result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident*.

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

- HELCOM-MORS. (2010). *Proficiency Test Determination of Radionuclides in Fish Flesh Sample*.
- Heldal, H. E., Stupakoff, I., & Fisher, N. S. (2001). Bioaccumulation of <sup>137</sup>Cs and <sup>57</sup>Co by five marine phytoplankton species. *Journal of Environmental Radioactivity*, 57(3), 231–236.
- Higashi, H., Morino, Y., Furuichi, N., & Ohara, T. (2015). Ocean dynamic processes causing spatially heterogeneous distribution of sedimentary caesium-137 massively released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Biogeosciences*, 12(23), 7107–7128.
- Horiguchi, T., Kodama, K., Aramaki, T., Miyata, Y., & Nagao, S. (2018). Radiocesium in seawater, sediments, and marine megabenthic species in coastal waters off Fukushima in 2012–2016, after the 2011 nuclear disaster. *Marine Environmental Research*, 137, 206–224.
- IAEA. (1986). *Summary Report on the Post-accident Review Meeting on the Chernobyl Accident*.
- IAEA. (1991). *International Atomic Energy Agency, The International Chernobyl Project: Technical Report*.
- IAEA. (1996a). *European Commission, International Atomic Energy Agency, World Health Organization, One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident*.
- IAEA. (1996b). *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources*.
- IAEA. (2005). *Chernobyl: Looking Back to Go Forward (Proc. Int. Conf Vienna, 2005)*.
- IAEA. (2015). *El accidente de Fukushima Daiichi: Informe del Director General*.
- Ikeuchi, Y. (2003). Temporal variations of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs concentrations in Japanese coastal surface seawater and sediments from 1974 to 1998. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(17–21), 2713–2726.
- I.L. Brisbin Jr. (1991). *Current Ornithology* (D. M. Power, Ed). Plenum Press.
- Iwata, K., Tagami, K., & Uchida, S. (2012). *Estimation of ecological half-lives of radiocesium in marine biota at the offshore of Fukushima, Japan*.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

- Iwata, K., Tagami, K., & Uchida, S. (2013). Ecological Half-Lives of Radiocesium in 16 Species in Marine Biota after the TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Environmental Science & Technology*, 47(14), 7696–7703.
- Japan Ministry of Agriculture. (2012). *Results of the inspection on radioactivity materials in fisheries products*. Press Release.
- Japan Ministry of Agriculture. (2024). *Results of the inspection on radioactivity materials in fisheries products*. Press Release.
- Jáuregui, M. (2018). Reconstrucción del accidente de la Central Nuclear de Fukushima Daiichi. Tesis doctoral, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia, Colombia.
- Jia, G., Triulzi, C., Marzano, F. N., Belli, M., & Vaghi, M. (2000). The fate of plutonium,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the Antarctic ecosystem. *Antarctic Science*, 12(2), 141–148.
- Johansen, M. P., Ruedig, E., Tagami, K., Uchida, S., Higley, K., & Beresford, N. A. (2015). Radiological Dose Rates to Marine Fish from the Fukushima Daiichi Accident: The First Three Years Across the North Pacific. *Environmental Science & Technology*, 49(3), 1277–1285.
- Kaeriyama, H. (2017). Oceanic dispersion of Fukushima-derived radioactive cesium: a review. *Fisheries Oceanography*, 26(2), 99–113.
- Kaeriyama, H., Fujimoto, K., Ambe, D., Shigenobu, Y., Ono, T., Tadokoro, K., Okazaki, Y., Kakehi, S., Ito, S., Narimatsu, Y., Nakata, K., Morita, T., & Watanabe, T. (2015). Fukushima-derived radionuclides  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in zooplankton and seawater samples collected off the Joban-Sanriku coast, in Sendai Bay, and in the Oyashio region. *Fisheries Science*, 81(1), 139–153.
- Kanda, J. (2013). Continuing  $^{137}\text{Cs}$  release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through 2012. *Biogeosciences*, 10(9), 6107–6113.
- Kasamatsu, F., & Ishikawa, Y. (1997). Natural Variation of radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  concentration in marine organisms with special reference to the effect of food habits and trophic level. *Marine Ecology Progress Series*, 160, 109–120.
- Kawai, H., Kitamura, A., Mimura, M., Mimura, T., Tahara, T., Aida, D., Sato, K., & Sasaki, H. (2014). Radioactive cesium accumulation in seaweeds by the

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

Fukushima 1 Nuclear Power Plant accident—two years' monitoring at Iwaki and its vicinity. *Journal of Plant Research*, 127(1), 23–42.

Kinoshita, N., Sueki, K., Sasa, K., Kitagawa, J., Ikarashi, S., Nishimura, T., Wong, Y.-S., Satou, Y., Handa, K., Takahashi, T., Sato, M., & Yamagata, T. (2011). Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19526–19529.

Kubo, A., Tanabe, K., Ito, Y., Ishimaru, T., Otsuki, M., Arakawa, H., Watanabe, Y. W., Miura, H., Tsumune, D., & Kanda, J. (2020). Changes in radioactive cesium concentrations from 2011 to 2017 in Fukushima coastal sediments and relative contributions of radioactive cesium-bearing microparticles. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111769.

Kubo, A., Tanabe, K., Suzuki, G., Ito, Y., Ishimaru, T., Kasamatsu-Takasawa, N., Tsumune, D., Mizuno, T., Watanabe, Y. W., Arakawa, H., & Kanda, J. (2018). Radioactive cesium concentrations in coastal suspended matter after the Fukushima nuclear accident. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 341–346.

Manolopoulou, M., Vagena, E., Stoulos, S., Ioannidou, A., & Papastefanou, C. (2011). Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102(8), 796–797.

McCreedy, C. D., Jagoe, C. H., Glickman, L. T., & Brisbin, I. L. (1997). Bioaccumulation of cesium-137 in yellow bullhead catfish ( *Ameiurus natalis* ) inhabiting an abandoned nuclear reactor reservoir. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(2), 328–335.

Morita, T., Ando, M., & Ohtsu, Y. (2019). Mass evacuation and increases in long-term care benefits: Lessons from the Fukushima nuclear disaster. *PLOS ONE*, 14(9), e0218835.

Murakami-Sugihara, N., Shirai, K., Tazoe, H., Mizukawa, K., Takada, H., Yamagata, T., Otosaka, S., & Ogawa, H. (2021). Spatiotemporal change of cesium-137 in the Pacific coast of Tohoku, Japan: The mussel watch approach. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112413.

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

- Neville, D. R., Phillips, A. J., Brodeur, R. D., & Higley, K. A. (2014). Trace Levels of Fukushima Disaster Radionuclides in East Pacific Albacore. *Environmental Science & Technology*, 48(9), 4739–4743.
- Núñez-Lagos Roglá, R. (2011). La radioactividad ambiental. Environmental radioactivity. Radioactividad ambiental. *Logos Ciencia & Tecnología*, 2(2), 50–61.
- Otosaka, S. (2017). Processes affecting long-term changes in <sup>137</sup>Cs concentration in surface sediments off Fukushima. *Journal of Oceanography*, 73(5), 559–570.
- Otosaka, S., Kamidaira, Y., Ikenoue, T., & Kawamura, H. (2022). Distribution, dynamics, and fate of radiocesium derived from FDNPP accident in the ocean. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 59(4), 409–423.
- Otosaka, S., & Kato, Y. (2014). Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 16(5), 978–990.
- Povinec, P. P., Hirose, K., & Aoyama, M. (2012). Radiostrontium in the Western North Pacific: Characteristics, Behavior, and the Fukushima Impact. *Environmental Science & Technology*, 46(18), 10356–10363.
- Rowan, D. J., Brinkmann, L., Carr, J., Pinder, J. E., & Rasmussen, J. B. (2015). *Predicting the bioaccumulation of Fukushima cesium-137 in the north Pacific 4 food web: a biokinetics model for migratory albacore tuna*. *Canadian Nuclear Laboratories*, 14(4), 1-22.
- Shigeoka, Y., Myose, H., Akiyama, S., Matsumoto, A., Hirakawa, N., Ohashi, H., Higuchi, K., & Arakawa, H. (2019). Temporal Variation of Radionuclide Contamination of Marine Plants on the Fukushima Coast after the East Japan Nuclear Disaster. *Environmental Science & Technology*, 53(16), 9370–9377.
- Sohtome, T., Wada, T., Mizuno, T., Nemoto, Y., Igarashi, S., Nishimune, A., Aono, T., Ito, Y., Kanda, J., & Ishimaru, T. (2014). Radiological impact of TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident on invertebrates in the coastal benthic food web. *Journal of Environmental Radioactivity*, 138, 106–115.
- Steinhauser, G., Brandl, A., & Johnson, T. E. (2014). Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 470–471, 800–817.

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

- Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., & Yasunari, T. J. (2012). Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(5), 2313–2343.
- Takata, H., Kusakabe, M., Inatomi, N., Hasegawa, K., Ikenoue, T., Watanabe, Y., Watabe, T., Suzuki, C., Misonoo, J., & Morizono, S. (2017). *Long-term Distribution of Radioactive Cesium in the Coastal Seawater and Sediments of Japan*.
- Tateda, Y., Tsumune, D., Tsubono, T., Aono, T., Kanda, J., & Ishimaru, T. (2015). Radiocesium biokinetics in olive flounder inhabiting the Fukushima accident-affected Pacific coastal waters of eastern Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 147, 130–141.
- Tokuyama, H., & Igarashi, S. (1998). Seasonal variation in the environmental background level of cosmic-ray-produced <sup>22</sup>Na at Fukui City, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 38(2), 147–161.
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., & Hirose, K. (2012). Distribution of oceanic <sup>137</sup>Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *Journal of Environmental Radioactivity*, 111, 100–108.
- Turekian, K. K., Nozaki, Y., & Benninger, L. K. (1977). Geochemistry of Atmospheric Radon and Radon Products. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 5(1), 227–255.
- UNSCEAR, U. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation*.
- Vives i Batlle, J., Aono, T., Brown, J. E., Hosseini, A., Garnier-Laplace, J., Sazykina, T., Steenhuisen, F., & Strand, P. (2014). The impact of the Fukushima nuclear accident on marine biota: Retrospective assessment of the first year and perspectives. *Science of The Total Environment*, 487, 143–153.
- Vives i Batlle, J., Aoyama, M., Bradshaw, C., Brown, J., Buesseler, K. O., Casacuberta, N., Christl, M., Duffa, C., Impens, N. R. E. N., Iosjpe, M., Masqué, P., & Nishikawa, J. (2018). Marine radioecology after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident: Are we better positioned to understand the impact of radionuclides in marine ecosystems? *Science of The Total Environment*, 618, 80–92.
- Wada, T., Fujita, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Mizuno, T., Sohtome, T., Kamiyama, K., Narita, K., Watanabe, M., Hatta, N., Ogata, Y., Morita, T., & Igarashi, S. (2016).

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: An update after five years. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, 312–324.

Wang, C., Cerrato, R. M., & Fisher, N. S. (2018). Temporal Changes in  $^{137}\text{Cs}$  Concentrations in Fish, Sediments, And Seawater off Fukushima Japan. *Environmental Science & Technology*, 52(22), 13119–13126.

Yamasaki, S., Imoto, J., Furuki, G., Ochiai, A., Ohnuki, T., Sueki, K., Nanba, K., Ewing, R. C., & Utsunomiya, S. (2016). Radioactive Cs in the estuary sediments near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Science of The Total Environment*, 551–552, 155–162.

Yasunari, T. J., Stohl, A., Hayano, R. S., Burkhart, J. F., Eckhardt, S., & Yasunari, T. (2011). Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19530–19534.

Yoshitome, R., Kunito, T., Ikemoto, T., Tanabe, S., Zenke, H., Yamauchi, M., & Miyazaki, N. (2003). Global Distribution of Radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$ ) in Marine Mammals. *Environmental Science & Technology*, 37(20), 4597–4602.

Zheng, J., Tagami, K., Watanabe, Y., Uchida, S., Aono, T., Ishii, N., Yoshida, S., Kubota, Y., Fuma, S., & Ihara, S. (2012). Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident. *Scientific Reports*, 2(1), 304.

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### 8. WEBGRAFÍA

Japan Ministry of Agriculture (2012): Results of the inspection on radioactivity materials in fisheries products, Press release. Disponible en: [https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/e120330\\_2.pdf](https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/pdf/e120330_2.pdf) [Consulta: 27-06-2024].

Japan Ministry of Agriculture (2024): Results of the inspection on radioactivity materials in fisheries products, Press release. Disponible en: <https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/attach/pdf/index-465.pdf> [Consulta: 27-06-2024].

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

### 9. ANEXOS

#### Anexo I

**Tabla I. 1.** Resultados de los documentos utilizados en la revisión bibliográfica sobre la bioacumulación temporal de <sup>137</sup>Cs en la biota marina. La tabla presenta el título de cada documento, el tipo de documento (artículo de revisión, experimental, capítulo de libro o informe), los autores, el año de publicación y el tipo de publicación (revista, libro o informe).

TÍTULO DE LA FUENTE	TIPO DE DOCUMENTO	AUTOR(ES)	AÑO DE PUBLICACIÓN	PUBLICACIÓN
Estimation of ecological half-lives of radiocesium in marine biota at the offshore of Fukushima, Japan	Informe	K. Iwata, K. Tagami y S. Uchida	2012	Environmental Science
Ecological Half-Lives of Radiocesium in 16 Species in Marine Biota after the TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident	Artículo experimental	Kayoko Iwata, Keiko Tagami, y Shigeo Uchida	2013	Environmental Science & Technology
Natural and Fukushima-derived radioactivity in macroalgae and mussels along the Japanese shoreline	Artículo experimental	Z. Baumann, N. Casacuberta, H. Baumann, P. Masque y N. S. Fisher	2013	Biogeosciences
Radioactive cesium accumulation in seaweeds by the Fukushima 1 Nuclear Power Plant accident—two years' monitoring at Iwaki and its vicinity	Artículo experimental	Hiroshi Kawai, Akira Kitamura, Mari Mimura, Tetsuro Mimura, Tomoya Tahara, Daiki Aida, Kenji Sato y Hideaki Sasaki	2014	Journal of Plant Research
* Fukushima-derived radionuclides <sup>134</sup> Cs and <sup>137</sup> Cs in zooplankton and seawater samples collected off the Joban-Sanriku coast, in Sendai Bay, and in the Oyashio region	Artículo experimental	Hideki Kaeriyama, Ken Fujimoto, Daisuke Ambe, Yuya Shigenobu, Tsuneo Ono, Kazuaki Tadokoro, Yuji Okazaki, Shigeho Kakehi, Shin-ichi Ito, Yoji Narimatsu, Kaoru Nakata, Takami Morita y Tomowo Watanabe	2014	Enviroment
Observation of Radionuclides in Marine Biota off the Coast of Fukushima Prefecture After TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident	Capítulo de libro	Tatsuo Aono, Yukari Ito , Tadahiro Sohtome , Takuji Mizuno, Satoshi Igarashi , Jota Kanda y Takashi Ishimaru	2014	Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident
The impact of the Fukushima nuclear accident on marine biota: Retrospective assessment of the first year and	Artículo de revisión	Jordi Vives i Batlle, Tatsuo Aono Justin E. Brown, Ali Hosseini, Jacqueline	2014	Science of the Total Environment

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

perspectives		Garnier-Laplace, Tatiana Sazykina, Frits Steenhuisen y Per Strand		
Radiological impact of TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident on invertebrates in the coastal benthic food web	Artículo experimental	Tadahiro Sohtome, Toshihiro Wada, Takuji Mizuno, Yoshiharu Nemoto, Satoshi Igarashi, Atsushi Nishimune, Tatsuo Aono, Yukari Ito, Jota Kanda y Takashi Ishimaru	2014	Journal of Environmental Radioactivity
* Distribution of Radioactive Material in Marine Ecosystems Off the Fukushima Coast: Radioactive Cesium Levels in Fukushima Marine Organisms	Capítulo de libro	Hisayuki Arakawa, Tadashi Tokai, Yoshinori Miyamoto, Seiji Akiyama, Keiichi Uchida, Akira Matsumoto, Miho Narita, Hiroshi Myouse, Yukio Agatsuma, Satoshi Katayama, Masaru Aoki, Ikuo Matsumoto y Naoto Hirakawa	2015	Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-Ecosystems
Radiological Dose Rates to Marine Fish from the Fukushima Daiichi Accident: The First Three Years Across the North Pacific	Artículo experimental	Mathew P. Johansen, Elizabeth Ruedig, Keiko Tagami, Shigeo Uchida, Kathryn Higley, y Nicholas A. Beresford	2015	Environmental Science & Technology
Status of <sup>137</sup> Cs contamination in marine biota along the Pacific coast of eastern Japan derived from a dynamic biological model two years simulation following the Fukushima accident	Artículo experimental	Yutaka Tateda, Daisuke Tsumune, Takaki Tsubono, Kazuhiro Misumi, Masatoshi Yamada, Jota Kanda y Takashi Ishimaru.	2016	Journal of Environmental Radioactivity
* Action Plan for Nuclear Safety - Project Marine Monitoring: Confidence Building and Data Quality Assurance. Progress Report. Inter-laboratory comparisons 2014-2015. Determination of radionuclides in seawater, sediment and fish.	Informe	AEA Environment Laboratories	2016	Monaco: AEA Environment Laboratories.
Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: An update after five years	Artículo experimental	Toshihiro Wada, Tsuneo Fujita, Yoshiharu Nemoto, Shinya Shimamura, Takuji Mizuno, Tadahiro Sohtome, Kyoichi Kamiyama, Kaoru	2016	Journal of Environmental Radioactivity

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

		Narita, Masato Watanabe, Nobuyuki Hatta, Yasuo Ogata, Takami Morita y Satoshi Igarashi		
* Temporal changes in <sup>137</sup> Cs concentrations in fish, sediments, and seawater off Fukushima Japan	Artículo experimental	Cuiyu Wang, Robert M. Cerrato y Nicholas S. Fisher	2018	Environmental Science & Technology
* Radiocesium in seawater, sediments, and marine megabenthic species in coastal waters off Fukushima in 2012–2016, after the 2011 nuclear disaster	Artículo experimental	Toshihiro Horiguchi, Keita Kodama, Takafumi Aramaki, Yoshiki Miyata y Seiya Naga	2018	Marine Environmental Research
Temporal Variation of Radionuclide Contamination of Marine Plants on the Fukushima Coast after the East Japan Nuclear Disaster	Artículo experimental	Yu Shigeoka, Hiroshi Myose, Seiji Akiyama, Akira Matsumoto, Naoto Hirakawa, Hideo Ohashi, Ken Higuchi y Hisayuki Arakawa	2019	Environmental Science & Technology
Slower Decrease in Radioactive Concentrations in Some Fish Species After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster	Capítulo de libro	Hisayuki Arakawa	2019	Oceanography Challenges to Future Earth
Spatiotemporal change of cesium-137 in the Pacific coast of Tohoku, Japan: The mussel watch approach	Artículo experimental	Naoko Murakami-Sugihara, Kotaro Shirai, Hirofumi Tazoe, Kaoruko Mizukawa, Hideshige Takada, Takeyasu Yamagata, Shigeyoshi Ootosaka y Hiroshi Ogawa	2021	Marine Pollution Bulletin

***\*Los títulos marcados con asteriscos indican que han sido utilizados en los resultados de otros objetivos secundarios.***

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

**Tabla I. 2.** Resultados de los documentos utilizados en la revisión bibliográfica sobre la acumulación temporal de  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina. La tabla presenta el título de cada documento, el tipo de documento (artículo de revisión, experimental, capítulo de libro o informe), los autores, el año de publicación y el tipo de publicación (revista, libro o informe).

TÍTULO DE LA FUENTE	TIPO DE DOCUMENTO	AUTOR(ES)	AÑO DE PUBLICACIÓN	PUBLICACIÓN
Assessment of the amount of cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters	Artículo experimental	C. Estournel, E. Bosc, M. Bocquet, C. Uises, P. Marsaleix, V. Winiarek, I. Osvath, C. Nguyen, T. Duhaut, F. Lyard, H. Michaud, F. Auclair	2012	Journal of Geophysical Research
Distribution of oceanic $^{137}\text{Cs}$ from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model	Artículo experimental	Daisuke Tsumune, Takaki Tsubono, Michio Aoyama y Katsumi Hirose	2012	Journal of Environmental Radioactivity
Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan	Artículo experimental	Ken O. Buesseler, Steven R. Jayne, Nicholas S. Fisher, Irina I. Rypina, Hannes Baumann, Zofia Baumann, Crystaline F. Breier, Elizabeth M. Douglass, Jennifer George, Alison M. Macdonald, Hiroomi Miyamoto, Jun Nishikawa, Steven M. Pike, Sashiko Yoshida	2012	Proceedings of the National Academy of Sciences
Continuing $^{137}\text{Cs}$ release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through 2012	Artículo experimental	J. Kanda	2013	Biogeosciences
* Fukushima-derived radionuclides $^{134}\text{Cs}$ and $^{137}\text{Cs}$ in zooplankton and seawater samples collected off the Joban-Sanriku coast, in Sendai Bay, and in the Oyashio region	Artículo experimental	Hideki Kaeriyama, Ken Fujimoto, Daisuke Ambe, Yuya Shigenobu, Tsuneo Ono, Kazuaki Tadokoro, Yuji Okazaki, Shigeho Kakehi, Shin-ichi Ito, Yoji Narimatsu, Kaoru Nakata, Takami Morita y Tomowo Watanabe	2014	Enviroment
Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: Initial deposition and inventories	Artículo experimental	Shigeyoshi Otsuka y Yoshihisa Kato	2014	Environmental Science: Processes & Impacts

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

Ocean dynamic processes causing spatially heterogeneous distribution of sedimentary caesium-137 massively released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant	Artículo experimental	H. Higashi, Y. Morino, N. Furuichi y T. Ohara	2015	Biogeosciences
Exposures and effects in the marine environment after the Fukushima accident	Artículo bibliográfico	J. Vives i Batlle	2015	Annals of the ICRP
* Action Plan for Nuclear Safety - Project Marine Monitoring: Confidence Building and Data Quality Assurance. Progress Report. Inter-laboratory comparisons 2014-2015. Determination of radionuclides in seawater, sediment and fish.	Informe	AEA Environment Laboratories	2016	Monaco: AEA Environment Laboratories.
Radioactive Cs in the estuary sediments near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant	Artículo experimental	Shinya Yamasaki, Junpei Imoto, Genki Furuki, Asumi Ochiai, Toshihiko Ohnuki, Keisuke Sueki, Kenji Nanba, Rodney C. Ewing, Satoshi Utsunomiya	2016	Science of the Total Environment
Fukushima Daiichi–Derived Radionuclides in the Ocean: Transport, Fate, and Impacts	Artículo de revisión	Ken Buesseler, Minhan Dai, Michio Aoyama, Claudia Benitez-Nelson, Sabine Charmasson, Kathryn Higley, Vladimir Maderich, Pere Masque, Deborah Oughton y John N. Smith	2017	Annual Review of Marine Science
Processes affecting long-term changes in <sup>137</sup> Cs concentration in surface sediments off Fukushima	Artículo experimental	Shigeyoshi Otsuka	2017	Journal of Oceanography
Long-term Distribution of Radioactive Cesium in the Coastal Seawater and Sediments of Japan	Informe	Hyo Takata, Masashi Kusakabe, Naohiko Inatomi, Kazuyuki Hasegawa, Takahito Ikenoue, Yukihiro Watanabe, Teruhisa Watabe, Chiyoshi Suzuki, Jun Misonoo, Shigemitsu Morizono	2017	Report. Marine Ecology Research Institute
Oceanic dispersion of Fukushima-derived radioactive cesium: a review	Artículo revisión	Hideki Kaeriyama	2017	Fisheries Oceanography

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

*Radiocesium in seawater, sediments, and marine megabenthic species in coastal waters off Fukushima in 2012–2016, after the 2011 nuclear	Artículo experimental	Toshihiro Horiguchi, Keita Kodama, Takafumi Aramaki, Yoshiki Miyata, Seiya Naga	2018	Marine Environmental Research
Marine radioecology after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident: Are we better positioned to understand the impact of radionuclides in marine ecosystems?	Artículo experimental	J. Vives i Batlle, M. Aoyama, C. Bradshaw, J. Brown, K.O. Buesseler, N. Casacuberta, M. Christl, C. Duffa, N.R.E.N. Impens, M. Iosjpe, P. Masqué, J. Nishikawa	2018	Science of the Total Environment
Radioactive cesium concentrations in coastal suspended matter after the Fukushima nuclear accident	Artículo experimental	Atsushi Kubo, Kai Tanabe, Genta Suzuki, Yukari Ito, Takashi Ishimaru, Nobue Kasamatsu-Takasawa, Daisuke Tsumune, Takuji Mizuno, Yutaka W. Watanabe, Hisayuki Arakawa, Jota Kanda	2018	Marine Pollution Bulletin
* Temporal changes in $^{137}\text{Cs}$ concentrations in fish, sediments, and seawater off Fukushima Japan	Artículo experimental	Cuiyu Wang, Robert M. Cerrato, Nicholas S. Fisher	2018	Environmental Science & Technology
Changes in radioactive cesium concentrations from 2011 to 2017 in Fukushima coastal sediments and relative contributions of radioactive cesium-bearing microparticles	Artículo experimental	Atsushi Kubo, Kai Tanabe, Yukari Ito, Takashi Ishimaru, Mayumi Otsuki, Hisayuki Arakawa, Yutaka W. Watanabe, Hikaru Miura, Daisuke Tsumune y Jota Kanda	2020	Marine Pollution Bulletin
Distribution, dynamics, and fate of radiocesium derived from FDNPP accident in the ocean	Artículo revisión	Shigeyoshi Otsaka, Yuki Kamidaira, Tsubasa Ikenoue, Hideyuki Kawamura	2021	Journal of Nuclear Science and Technology

*\* Los títulos marcados con asteriscos indican que han sido utilizados en los resultados de otros objetivos secundarios.*

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

**Tabla I. 3.** Resultados de los documentos utilizados en la revisión bibliográfica sobre el proceso de biomagnificación  $^{137}\text{Cs}$  en las cadenas tróficas marinas. La tabla presenta el título de cada documento, el tipo de documento (artículo de revisión, experimental, capítulo de libro o informe), los autores, el año de publicación y el tipo de publicación (revista, libro o informe).

TÍTULO DE LA FUENTE	TIPO DE DOCUMENTO	AUTOR(ES)	AÑO DE PUBLICACIÓN	PUBLICACIÓN
Predicting the bioaccumulation of Fukushima cesium-137 in the north Pacific 4 food web: a biokinetics model for migratory albacore tuna.	Artículo experimental	D.J. Rowan, L. Brinkmann, J. Carr, J.E. Pinder, y J.B. Rasmussen	2015	Biological Sciences – Environmental Sciences, Ecology
Radiocesium biokinetics in olive flounder inhabiting the Fukushima accident-affected Pacific coastal waters of eastern Japan	Artículo experimental	Yutaka Tateda, Daisuke Tsumune, Takaki Tsubono, Tatsuo Aono, Jota Kanda y Takashi Ishimaru.	2015	Journal of Environmental Radioactivity
* Distribution of Radioactive Material in Marine Ecosystems Off the Fukushima Coast: Radioactive Cesium Levels in Fukushima Marine Organisms	Artículo experimental	Hisayuki Arakawa, Tadashi Tokai, Yoshinori Miyamoto, Seiji Akiyama, Keiichi Uchida, Akira Matsumoto, Miho Narita, Hiroshi Myouse, Yukio Agatsuma, Satoshi Katayama, Masaru Aoki, Ikuo Matsumoto y Naoto Hirakawa	2015	Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-Ecosystems
Modeling $^{137}\text{Cs}$ bioaccumulation in the salmon–resident killer whale food web of the Northeastern Pacific following the Fukushima Nuclear Accident	Artículo experimental	Juan José Alava y Frank A.P.C. Gobas	2016	Science of the Total Environment
Numerical modelling of $^{137}\text{Cs}$ content in the pelagic species of the Japanese Pacific coast following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident using a size-structured food-web model	Artículo experimental	Mokrane Belharetl, Sabine Charmasson, Daisuke Tsumunel, Mireille Arnaud y Claude Estournel	2019	Plos One

\* Los títulos marcados con asteriscos indican que han sido utilizados en los resultados de otros objetivos secundarios.

## Impacto acumulativo del <sup>137</sup>Cs en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

**Tabla I. 4.** Resultados de las concentraciones de <sup>137</sup>Cs (Bq/Kg) en la biota marina tras el desastre de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Los organismos marinos contemplados son peces pelágicos, peces bentónicos, algas rojas, algas verdes, algas pardas, moluscos, equinodermos y artrópodos en tres ubicaciones: N (área norte), FDNPP (área de la central nuclear de Fukushima Daiichi) y S (área sur). Los datos abarcan el período de 2011 a 2016, donde N.D. indica niveles no detectados para ese año.

TIPO DE MUESTRA	UBICACIÓN	2011 (Bq/kg)	2012(Bq/kg)	2013 (Bq/kg)	2014 (Bq/kg)	2015 (Bq/kg)	2016 (Bq/kg)	Referencia
Peces pelágicos	N	2,48E+01	2,42E+01	2,08E+01	7,80E+00	3,80E+00	1,63E+00	(AEA Environment Laboratories, 2016; Aono <i>et al.</i> , 2014; Arakawa, 2019; Arakawa <i>et al.</i> , 2015; Baumann <i>et al.</i> , 2013; Horiguchi <i>et al.</i> , 2018; Iwata <i>et al.</i> , 2012, 2013; Japan Ministry of Agriculture, 2024; Johansen <i>et al.</i> , 2015; Kawai <i>et al.</i> , 2014; Murakami-Sugihara <i>et al.</i> , 2021; Shigeoka <i>et al.</i> , 2019; Sohtome <i>et al.</i> , 2014; Tateda <i>et al.</i> , 2015; Tsumune <i>et al.</i> , 2012; Vives i Batlle <i>et al.</i> , 2014; Wada <i>et al.</i> , 2016; Wang <i>et al.</i> , 2018)
	FDNPP	1,08E+01	1,09E+02	4,26E+01	1,62E+01	1,54E+01	1,23E+01	
	S	N.D.	4,00E+01	2,13E+01	1,80E+01	7,37E+00	N.D.	
Peces bentónicos	N	1,23E+01	1,44E+01	6,94E+00	5,16E+00	6,37E+00	1,17E+00	
	FDNPP	2,73E+01	1,14E+02	1,10E+02	2,66E+01	1,64E+01	1,45E+01	
	S	N.D.	3,51E+01	2,49E+01	2,07E+01	2,23E+01	1,53E+01	
Algas rojas	N	1,21E+02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	FDNPP	1,82E+02	7,27E+01	2,39E+01	N.D.	N.D.	N.D.	
	S	N.D.	1,05E+01	9,43E-01	N.D.	3,77E-01	N.D.	
Algas verdes	N	1,57E+02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	FDNPP	2,01E+03	9,37E+01	6,79E+01	N.D.	N.D.	N.D.	
	S	4,35E+02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
Algas pardas	N	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	FDNPP	7,58E+02	9,29E+01	2,02E+01	N.D.	N.D.	N.D.	
	S	2,82E+02	3,91E+00	7,72E-01	3,02E-01	2,43E-01	N.D.	
Moluscos	N	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	FDNPP	2,85E+01	N.D.	N.D.	7,67E+00	N.D.	N.D.	
	S	N.D.	N.D.	2,63E-03	4,49E-01	7,02E+00	N.D.	
Equinodermos	N	N.D.	5,17E+00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	FDNPP	1,07E+02	N.D.	4,47E+00	2,80E+00	N.D.	N.D.	
	S	N.D.	6,89E+00	1,01E+01	7,13E-02	N.D.	N.D.	
Artrópodos	N	N.D.	N.D.	N.D.	2,10E-03	N.D.	N.D.	
	FDNPP	7,80E+00	N.D.	N.D.	1,50E+01	N.D.	N.D.	
	S	N.D.	N.D.	4,69E-03	8,22E-01	N.D.	N.D.	

## Impacto acumulativo del $^{137}\text{Cs}$ en el ecosistema marino tras el accidente de Fukushima. Revisión bibliográfica.

**Tabla I. 5.** Resultados de las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en la biota marina tras el desastre de la central nuclear de Fukushima Daiichi). Los tipos de muestra considerados son agua de mar superficial, agua de mar de fondo y sedimentos, en tres ubicaciones: N (área norte), FDNPP (área de la central nuclear de Fukushima Daiichi) y S (área sur). Los datos abarcan el período de 2011 a 2016, donde N.D. indica niveles no detectados para ese año

TIPO DE MUESTRA	UBICACIÓN	2011 (Bq/kg)	2012 (Bq/kg)	2013 (Bq/kg)	2014 (Bq/kg)	2015 (Bq/kg)	2016 (Bq/kg)	Referencia
Agua de mar superficial	N	9,90E-01	2,76E+00	6,04E+00	6,55E+01	3,28E+01	N.D.	(AEA Environment Laboratories, 2016; Battle, 2015; K. Buesseler <i>et al.</i> , 2017; K. O. Buesseler <i>et al.</i> , 2012; Estournel <i>et al.</i> , 2012; Higashi <i>et al.</i> , 2015; Horiguchi <i>et al.</i> , 2018; Kaeriyama, 2017; Kaeriyama <i>et al.</i> , 2015; Kanda, 2013; Kubo <i>et al.</i> , 2018, 2020; Otosaka, 2017; Otosaka <i>et al.</i> , 2022; Otosaka y Kato, 2014; Takata <i>et al.</i> , 2017; Vives i Battle <i>et al.</i> , 2018; Wang <i>et al.</i> , 2018; Yamasaki <i>et al.</i> , 2016)
	FDNPP	6,02E+03	1,89E-01	4,70E-02	5,75E+01	1,54E-01	N.D.	
	S	N.D.	1,20E-01	7,50E-02	6,96E+01	2,32E+01	3,46E+01	
Agua de mar de fondo	N	N.D.	4,89E-02	5,55E-02	3,81E+01	4,68E+01	3,96E+01	
	FDNPP	N.D.	2,53E-02	4,43E-02	6,49E+01	1,93E+01	N.D.	
	S	N.D.	5,73E-02	3,78E-02	4,10E+01	2,45E+01	N.D.	
Sedimentos	N	N.D.	7,67E-03	2,17E+01	6,71E+00	3,74E+00	3,11E+00	
	FDNPP	N.D.	3,38E-02	8,99E+00	7,45E+00	6,59E+00	6,69E+00	
	S	N.D.	2,58E-01	3,15E+01	6,17E+01	4,80E+01	7,80E+01	