

**GEO-INGENIERÍA MARINA EN CHILE:  
EXPERIMENTOS COMERCIALES DE  
FERTILIZACIÓN CON HIERRO EN AGUAS  
JURISDICCIONALES DE CHILE**

**Informes y antecedentes solicitados por DIRECTEMAR**

**JULIO 2017**

# INDICE

## 1. Informe de antecedentes científicos relevantes a propuestas de geo-ingeniería marina en Chile: experimentos de fertilización con hierro en aguas costeras y de transición costera frente a Chile

### 1.1 Introducción

### 1.2 Antecedentes científicos relevantes a la propuesta extranjera de fertilización con hierro frente a Coquimbo

### 1.3 Principales consideraciones y riesgos ambientales asociadas a propuestas de fertilización artificial con hierro en forma directa sobre aguas jurisdiccionales frente a Coquimbo

## 2. Infor

Atención: Solamente sección 1, el Informe de Antecedentes Científicos está publicado aquí. Las otras secciones tienen autores distintos. Se puede solicitar a los autores específicos de estas secciones para acceso a ellas

## 3. Presentaciones en el Foro IMO - Geo-ingeniería: Fertilización con hierro en los Océanos - en el XXXVII Congreso de Ciencias del Mar 2017, Sociedad Chilena de Ciencias del Mar

### 3.1. Instituto Milenio de Oceanografía (IMO): Introducción

### 3.2. Dr. Phil Boyd : Ocean Iron enrichments- principles, benefits and challenges

### 3.3. Dr. Adrian Marchetti : Phytoplankton response to iron fertilization: Ecological consequences and risks

### 3.4. Dr. Humberto González : The Lohafex Iron-Fertilization Experiment in the S-W Atlantic Ocean (northern- ACC)

### 3.5. Resumen del foro IMO

## 4. Anexos

### A. Artículos de Prensa relacionados a la propuesta OES

### B. Cartas y Material de difusión relacionado a la propuesta de OES

- Copia cartas a Ministro de Medio Ambiente y Subsecretario de Pesca
- Copia carta de Subsecretaría de Pesca a Secretario General del Senado
- Afiche y díptico de difusión sobre las 10 Razones para no realizar una fertilización con hierro con fines comerciales en aguas marinas chilenas

# **1. Informe de antecedentes científicos relevantes a propuestas de geo-ingeniería marina en Chile: experimentos de fertilización con hierro en aguas costeras y de transición costera frente a Chile**

Contribuyentes:

P. von Dassow<sup>1,2</sup>, C.E. Morales<sup>1,3</sup>, C. A. Vargas<sup>1,4,5</sup>, O. Pizarro<sup>1,6</sup>, S. Hormazábal<sup>1,7</sup>, R. Torres<sup>8,9</sup>, P.A. Auger<sup>1,7</sup>

- (1) Instituto Milenio de Oceanografía (IMO-Chile)
- (2) Depto. Ecología, Pontificia Universidad Católica de Chile
- (3) Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción
- (4) Departamento de Sistemas Acuáticos, Facultad de Ciencias Ambientales & Centro de Ciencias Ambientales EULA Chile, Universidad de Concepción
- (5) Centro para el Estudio de Forzantes Múltiples sobre Sistemas Socio-Ecológicos Marinos (MUSELS)
- (6) Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción
- (7) Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
- (8) Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), Coyhaique, Chile.
- (9) Centro de Investigación: Dinámica de Ecosistemas marinos de Altas Latitudes (IDEAL), Punta Arenas, Chile.

Nota: Distribución de este documento es solo para DIRECTEMAR; otros usos deben ser convenidos con los autores contribuyentes, representados por Dr. P. von Dassow y la Dra. Carmen Morales.

## 1.1. Introducción

La geo-ingeniería es la manipulación deliberada del sistema Tierra con el objetivo de generar una reacción sistémica definida, por ejemplo, la intensificación o la disminución de un proceso natural. La geo-ingeniería es postulada como una potencial herramienta para el control de perturbaciones globales provocadas por la acción humana. La fertilización de la capa fótica del mar con sales de hierro, en sistemas deficientes en dicho elemento, ha sido propuesta para estimular la producción primaria del fitoplancton y causar el secuestro de dióxido de carbono vía su exportación hacia el océano profundo, su sedimentación y posterior enterramiento en el fondo marino y/o su transformación en producción pesquera por medio de la dinámica trófica del sistema (Wallace et al., 2010). Para cualquiera de estos propósitos finales, la fertilización del océano es clasificada como geo-ingeniería marina, según el “Protocolo de Londres” (enmienda de 2013). La captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en los océanos por medio de la fertilización artificial con hierro, u otros nutrientes, tiene además un fuerte componente comercial en relación a la venta de bonos de carbono. Es así como algunas empresas y organizaciones han sugerido o realizado acciones directas de adición de hierro en los últimos 10 años, lo que a su vez ha generado acciones de organismos de alcance internacional, a través de convenios firmados por múltiples países (Protocolo de Londres y Convenio de la Biodiversidad). Recientemente, algunas empresas comerciales han propuesto la fertilización del océano con el propósito de incrementar la abundancia de peces. La enmienda de 2013 al Protocolo de Londres también incluye este propósito en la definición de geo-ingeniería marina.

En el marco asociado a la geo-ingeniería marina, la empresa canadiense Oceaneos Environmental Solutions (abreviada aquí como OES) anunció en la prensa de su país (abril 2016) su intención de realizar un proyecto/experimento de fertilización con hierro en aguas frente a Chile con el propósito de estimular las pesquerías. En sus argumentos (según el sitio web de OES), la empresa hace referencia a literatura científica que sugiere que, a nivel global, tanto la producción primaria como las pesquerías experimentan una tendencia de disminución importante. Pero, a la fecha, no existen publicaciones que den cuenta del efecto de estas fertilizaciones sobre las comunidades/poblaciones de peces y/o sus pesquerías. Con el objetivo de darle un carácter científico a su propuesta, OES ha creado recientemente una fundación sin fines de lucro del mismo nombre, la cual incluye un panel científico (sitio web de OES). Sin embargo, inicialmente OES fue, y a nuestro entender sigue siendo, una organización con fines de lucro (ver anexo “Antecedentes de emprendimiento con fines comerciales por parte de emprendimiento OES”).

Desde 2014, OES viene realizando un intenso lobby con autoridades públicas y organizaciones de pescadores artesanales en Chile para dar a conocer este proyecto. Además, en 2014 y 2016 recibió financiamiento público para realizar sus actividades en Chile (fondos CORFO vía el programa START-UP 2014-2016 del Ministerio de Economía). Durante el presente año, OES anunció su propuesta en periódicos nacionales (por ej. El Mercurio, abril 2017) y luego en otros medios de difusión (por ej. [www.aqua.cl](http://www.aqua.cl)). Sin embargo, la propuesta completa y detallada no está disponible al público general ni ha sido presentada oficialmente a agencias gubernamentales relevantes, tales como: a) la Dirección de Territorio Marítimo (DIRECTEMAR), entidad que es representante nacional en la Organización Marítima Internacional (IMO) y a cargo del cumplimiento del Protocolo de Londres en aguas de jurisdicción nacional, b) el Servicio Hidrográfico Oceanográfico (SHOA) que autoriza las

investigaciones científicas en estas aguas, o c) la Subsecretaría de Pesca (SubPesca) cuando se refiere a investigaciones que involucran pesca de investigación sobre recursos en aguas jurisdiccionales.

La información entregada por OES sobre su propuesta de fertilización oceánica, en comunicaciones a la prensa y a través de su sitio web, es vaga, sólo explicitando que sus planes incluyen un experimento de fertilización con hierro en la zona frente a Coquimbo (~30°S) que involucra la descarga de 10 toneladas de hierro en un remolino de mesoescala ubicado a ~130 km desde la costa (zona de transición costera). Esta cantidad de fertilizante (10 toneladas) es muy superior a las fertilizaciones con hierro realizadas previamente en aguas oceánicas (>1000 km de la costa), las cuales han generado respuestas biológicas a nivel de comunidades fitoplanctónicas de diversa naturaleza (de Baar et al., 2005; Wallace et al., 2010; Smetacek et al., 2012). El tipo de experimento propuesto por OES, no ha sido realizado anteriormente (según consta en su propia página web). El Protocolo de Londres exige que investigaciones de esta naturaleza sean presentadas oficialmente antes de ser ejecutadas.

El propósito de este informe es recopilar y analizar antecedentes científicos existentes sobre la fertilización con hierro y así evaluar sus potenciales efectos en el ecosistema en la zona de Coquimbo. Se adjunta a este informe (1) los archivos de las ponencias de un foro especial realizado durante el Congreso de Ciencias de Mar (Mayo 2017), para informar y discutir sobre este tema, y (2) otros documentos relacionados, incluyendo comunicados/entrevistas/artículos de prensa y declaraciones públicas de parte de miembros de la comunidad científica chilena como por la empresa OES, y (3) un anexo analizando los antecedentes de emprendimiento con fines comerciales por parte del emprendimiento OES.

## 1.2. Antecedentes científicos relevantes a la propuesta extranjera de fertilización con hierro frente a Coquimbo

### 1. Contexto oceanográfico de la región centro-norte de Chile, con enfoque en la zona de Coquimbo (30°S).

*Resumen: Existe una compleja circulación frente a 30° S y una rica estructura de masas de agua. La costa presenta un importante centro de surgencia de aguas sub-superficiales (ubicadas a más de 50 m de profundidad). Hay tres masas de agua que pueden influenciar la capa superficial (primeros 50 m) del mar: Agua Subtropical, Agua Sub-Antártica con un flujo promedio hacia el norte y Agua Ecuatorial Sub-Superficial con un flujo promedio hacia el sur. Estas aguas presentan propiedades distintas en salinidad, temperatura, contenido de oxígeno disuelto y nutrientes, por ejemplo, el Agua Ecuatorial Sub-Superficial es muy baja en su contenido de oxígeno. Las corrientes en los primeros 400 m son muy dinámicas, formando remolinos de mesoescala (vórtices de aproximadamente 100 km a 200 km de diámetro), frentes, corrientes en chorro (jet y filamentos) y un complejo patrón de recirculación. Este dinamismo provoca gran variabilidad espacial y temporal haciendo muy complejo predecir qué área será afectada por una fertilización realizada en una ubicación particular.*

El Sistema de Corrientes de Perú-Chile (SCPC), conocido también como Sistema de Corriente de Humboldt, transporta aguas hacia el ecuador y es parte de la rama oriental del giro subtropical del Pacífico Sur (Fig. 1). Este giro es forzado por el esfuerzo del viento que actúa sobre la superficie del mar, el cual genera también surgencia de aguas frías, de bajo contenido de oxígeno y ricas en nutrientes a lo largo de la costa norte, centro y centro-sur de Chile (Fig. 2). En esta región existen varias masas de agua que se distinguen por su temperatura, salinidad y otras propiedades, físicas, químicas y biológicas (Fig. 3). Estas propiedades dependen de la región de origen de la masa de agua y de la trayectoria que ésta ha seguido desde su zona de formación (Tomczack & Godfrey, 1994). En la zona centro-norte de Chile, las Aguas Centrales del Pacífico Suroriental, conocidas localmente como Aguas Subtropicales (AST), ocupan la capa superficial al norte del frente subtropical. Al sur de este frente se encuentra en superficie Aguas Subantárticas (ASAA) de muy baja salinidad. Estas aguas son modificadas por los flujos locales de agua dulce, incluyendo los aportes de aguas continentales (Schneider, et al., 2003). En el norte y centro norte de Chile, estas aguas se encuentran inmediatamente bajo las AST y dan origen al Mínimo Somero de Salinidad (Fig. 3). Bajo este mínimo salino, se ubican las Aguas Ecuatoriales Sub-Superficiales (AESS) que contienen altas concentraciones de nutrientes, alta salinidad y valores muy bajos de oxígeno disuelto (Strub et al., 1998; Silva et al., 2009). En efecto, uno de los rasgos oceanográficos más distintivos frente a Chile es la presencia de una Zona de Mínimo de Oxígeno disuelto (ZMO) ubicada entre ~100 m y ~400 m de profundidad (Fig. 2 y 3) que se extiende sobre gran parte de la plataforma continental. Desplazamientos de estas aguas de muy bajo contenido de oxígeno disuelto (subóxicas o incluso anóxicas) asociados a la surgencia, pueden restringir el hábitat o incluso atrapar y sofocar a poblaciones de peces e invertebrados cerca de la costa, resultando en varazones naturales (Bertrand et al., 2010; Hernández-Miranda et al. 2010; Rabalais et al. 2010; Escribano et al., 2016).

Superpuesta a la circulación de gran escala, existen energéticas corrientes de mesoescala asociadas a remolinos con diámetros horizontales típicos de 10 a 100 km. Estos remolinos están presentes en todas las regiones del océano (Chelton et al., 2011). Pero la zona de transición costera

frente a Chile, al igual que en otros bordes orientales (conformadas por los primeros ~500 km desde el borde de la plataforma continental), son particularmente ricas en remolinos y en otras estructuras de mesoescala como filamentos, meandros y frentes (Hormazabal et al., 2004; Letelier et al., 2004; Morales et al., 2007, 2012). Los remolinos que se generan en la zona de transición costera migran lentamente en dirección oeste-noroeste, alejándose de la costa (Fig. 2). Estos remolinos son estructuras coherentes y pueden producir un transporte costa-afuera de aguas ricas en nutrientes y materia orgánica, incluyendo organismos con baja capacidad natatoria (Correa-Ramirez et al., 2007; Hormazabal et al., 2013; Zhang et al., 2014; Cornejo-D'Ottone et al., 2016). Los remolinos de mesoescala pueden contribuir directamente al incremento de la productividad biológica al incrementar el flujo de nutrientes hacia la superficie o indirectamente mediante la interacción con el viento (McGillicuddy et al., 2007) o por la formación de estructuras físicas de menor tamaño (submesoescala), las cuales contribuyen, a su vez, a la inyección de aguas ricas en nutrientes hacia la superficie (Mahadevan, 2016; McWilliams, 2016). Sin embargo, los remolinos de mesoescala también podrían reducir la producción biológica en los sistemas de surgencia de borde oriental al transportar nutrientes desde la costa hacia el océano abierto (Gruber et al., 2011).

Cerca de 30°S existe una región de intensa surgencia costera asociada a Punta Lengua de Vaca (Torres et al., 1999; Montecino et al., 2000). En esta zona, los vientos favorables a la surgencia predominan durante todo el año, pero son más intensos en primavera (Shaffer et al., 1999; Rutllant et al., 2002; 2004). Los vientos promedios favorables a la surgencia muestran un máximo justo en esta región y marcan una zona de transición climática (Rutllant et al., 2002). Durante eventos intensos de surgencia las aguas que llegan a superficie en esta zona son una mezcla de ASAA y AESS, pero durante eventos menos intensos la proporción de AESS, cuyo núcleo se ubica a mayor profundidad, es menor. Consecuentemente, eventos débiles de surgencia aportan mucho menos nutrientes a la capa superficial (Brandhorst, 1971; Torres et al., 1999). En Fig. 4 se muestra un ejemplo de la compleja circulación de mesoescala en la zona frente a Coquimbo durante febrero y marzo 2017 (basado en datos satelitales<sup>1</sup>) que ilustra el contexto en el cuál se desarrollaría el experimento de OES que involucra la selección de uno de los remolinos de mesoescala a ~130 km de la costa.

## **2. Limitación por hierro sobre la producción primaria y evidencia en la zona de Coquimbo**

*Resumen: Dadas las comparaciones entre situaciones análogas de los Sistemas de California y Perú-Chile, se sospecha que la producción primaria a 30° S es limitada por la falta de hierro en ciertos periodos y áreas. También existe evidencia directa (de experimentos en botellas) que la adición de hierro puede estimular la fotosíntesis y la producción de microalgas en estos periodos y áreas (pero no*

---

<sup>1</sup> Los datos de clorofila superficial (diarios y de 1 km de resolución) fueron obtenidos de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer de los satélites Aqua y Terra, NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Chlorophyll Data; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>. Las Corrientes geostroficas fueron calculadas de datos de altimetría del nivel del mar procesados por Ssalto/Duacs, que integra datos de todas las misiones satelitales para medición de altimetría del nivel del mar (HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, OSTM/Jason-2, Jason-1, Topex/Poseidon, Envisat, GFO, ERS-1&2). Datos son distribuidos por AVISO, <http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>.

*en otros periodos). Todavía no está bien entendido cómo predecir los periodos y lugares en donde la adición de hierro tendría un efecto.*

En el ~30% del área total de los océanos la producción primaria estaría limitada por la escasez de hierro como micro-nutriente (Moore et al., 2013), principalmente por su ubicación lejana de fuentes de aportes eólicos (de polvo o aerosoles de suelos terrestres que contiene hierro) (Jickells et al., 2005; Jickells & Moore, 2015) . Generalmente, las zonas cercanas a la costa reciben suficientes aportes de hierro por fuentes como aguas sub-superficiales o sedimentos del fondo marino, aportes fluviales de sedimentos o aportes eólicos de polvo continental. Sin embargo, en la costa de California y Perú algunos estudios han mostrado que una limitación por hierro puede ocurrir en la zona de transición costera o incluso en la zona costera, cuando las aguas sub-superficiales que afloran durante los procesos de surgencia no han interactuado con el fondo marino –por ejemplo, en sitios con una plataforma continental estrecha – y/o cuando los patrones de vientos no son favorables al aporte eólico o los aportes de ríos son insuficientes (Hutchins et al., 1998, 2002; Bruland et al., 2001, 2005; Biller & Bruland, 2014).

Al sur de Coquimbo, Punta Lengua de Vaca presenta una de las surgencias más intensas en la región y sin embargo, los máximos reportados de producción primaria son entre 40% y 70% menores que los máximos reportados en las otras zonas de surgencia costera en la misma región (Daneri et al., 2000; Montecino et al., 2006). Las mediciones directas de clorofila-a, un indicador de la biomasa fitoplanctónica, reflejan en parte esta tendencia (Torres 1995), pero en algunas ocasiones se han encontrado valores altos (Montecino et al., 1998). Las observaciones satelitales de clorofila-a superficial registran un promedio climatológico con niveles altos solo muy cerca de la costa, a diferencia de otras zonas de surgencia en la región, como Concepción donde se extienden bastante más afuera (Yuras et al., 2005; Torres & Ampuero, 2009; Correa-Ramirez et al., 2012).

Sobre esta base, el Dr. Rodrigo Torres ha planteado la hipótesis de limitación por hierro en la producción primaria en la zona de Coquimbo, dada las condiciones similares con la costa de California: plataforma continental relativamente estrecha, falta de aportes de ríos, y la dirección de viento predominante. El Dr. Torres y sus colegas han realizado varias mediciones y experimentos en botellas frente la costa de Coquimbo para probar esta hipótesis en los últimos 15 años, pero parte importante de esto aún no ha sido publicado. Las mediciones simultáneas de los niveles de nitrato, fosfato, silicato y hierro en la capa superficial (<20 m) de esta zona apoyan la hipótesis de de Torres dado que aguas de surgencia reciente han mostrado concentraciones relativamente bajas de hierro total pero altas concentraciones de nitrato, fosfato y silicato. Sin embargo, es importante destacar que en algunas ocasiones las concentraciones de hierro fueron más altas (>2 nM) asociadas con altos niveles de nitrato (>5 µM). A su vez, Torres & Ampuero (2009) realizaron experimentos de incubación de agua de mar natural con/sin adición de hierro en botellas en la zona frente a 30°S (año 2007), mostrando evidencias de limitación de la producción de fitoplancton por falta de este elemento. En las estaciones ubicadas fuera de la plataforma continental, el nivel de CO<sub>2</sub> disuelto en el agua fue menor (más fotosíntesis) en las botellas enriquecidos con hierro que en las del control sin hierro, mientras que en las estaciones sobre la plataforma continental no hubo diferencias. Otros resultados de experimentos semejantes realizados anteriormente (años 2002 y 2006) por Torres indicaron la misma tendencia de mayor consumo de CO<sub>2</sub> y nitrato o silicato, y mayor aumento de clorofila-a en botellas a las cuales se añadió hierro en comparación con los controles (datos no publicados; ejemplo de resultados experimentales en Fig. 5).

Torres y Ampuero (2009) sugieren que los procesos de surgencia dominados por el ascenso de ASAA son los que producirían la limitación por hierro en la producción primaria en la zona de Coquimbo. En contraste, cuando las aguas que surgen son principalmente relacionadas a AESS en su origen, la producción no es limitada por falta de hierro. Las AESS son aguas subsuperficiales anóxicas que pueden acumular hierro por interacción directa con los sedimentos sobre la plataforma (Bruland et al., 2005) o por re-mineralización de partículas orgánicas sujetas a sedimentación en esta capa. Los resultados de un experimento realizado en agosto de 2016 frente a Coquimbo (von Dassow y Torres, datos no publicados) indican que en un periodo cuando las aguas superficiales fueron de alta salinidad (35.0 indicando la predominancia de AST y AESS), no se encontraron diferencias en el crecimiento o fisiología de fitoplancton entre las botellas enriquecidas por hierro y controles sin adición. A una distancia de 2000 km al oeste de la costa, la falta de hierro limita la producción primaria en aguas superficiales (Bonnet et al., 2008), pero generalmente se espera que el Agua Sub-Tropical (AST) cerca de la costa esté limitada por bajas concentraciones de macro-nutrientes, no por falta de hierro. Aún no hay datos suficientes para precisar a qué distancia de la costa cambia el nutriente que limita la producción primaria.

En resumen, existe evidencia que indica que la producción primaria en la zona de surgencia costera de Coquimbo podría exhibir limitación por hierro en ciertos periodos y áreas. La evidencia actualmente disponible sugiere, que al igual que la zona de surgencia de California, la zona de Coquimbo se caracterizaría por un mosaico de aguas limitadas y no-limitadas por hierro. Sin embargo, los antecedentes existentes hasta la fecha son todavía insuficientes para entender y predecir los efectos de limitación por falta de hierro sobre la producción primaria en esta zona y los estudios deberían abordar esto en forma más controlada que una fertilización en aguas abiertas como pretende OES.

### **3. Aspectos relevantes de las comunidades fitoplanctónicas en la zona ~30°S**

*Resumen: La variabilidad de las comunidades de fitoplancton frente a 30° S ha sido menos estudiada que en otras partes de la costa de Chile. Sin embargo, los datos disponibles indican que diatomeas (un tipo de microalgas) responderían más que otras microalgas frente la fertilización del océano con hierro en la zona. Un grupo de diatomeas del género Pseudo-nitzschia es común en la zona. Estas especies son microalgas tóxicas, y han producido eventos de floraciones tóxicas de microalgas con contaminación de mariscos. Además, su crecimiento y su toxicidad son más estimuladas que el crecimiento de otras microalgas cuando se enriquece agua de mar de la zona con sales de hierro en experimentos en botellas, igual que se han sido observado con estas especies en experimentos en otras partes del mundo, tanto en botellas como en experimentos de adición de sales de hierro directamente en el océano. Por eso, en esta zona se considera que existe más alto el riesgo que una fertilización directa del océano con hierro estimularía un florecimiento tóxico de microalgas.*

En las zonas de surgencia costera generalmente se encuentran florecimientos de fitoplancton dominados por células mayores de 10 µm (0.01 mm) de diámetro, especialmente del grupo de las

diatomeas (microalgas con paredes de sílice). Los géneros principales de diatomeas en las zonas y épocas de surgencia en Chile son *Chaetoceros*, *Skeletonema*, y *Thalassiosira*, todos son organismos que forman largas cadenas de células, mientras que especies de fitoplancton con células más pequeñas, y que no forman cadenas, son más importantes en periodos de no-surgencia (Anabalón et al., 2007, 2016; Morales and Anabalón, 2012). En general, las diatomeas frecuentemente dominan el fitoplancton durante periodos de mayor productividad en los sistemas costeros dada su mayor tolerancia a la turbulencia y su capacidad de aprovechar de forma más eficiente los grandes pulsos de macro-nutrientes (sílice y nitrato) (Margalef, 1978) y cuando hay también pulsos suficientes en hierro (de Baar et al., 2005).

En la zona de Coquimbo, no existen muchos trabajos científicos (publicados) que caractericen la estructura (composición, abundancia, biomasa, etc.) de las comunidades fitoplanctónicas, pero si se ha observado que organismos pequeños (<8  $\mu\text{m}$ ) juegan un papel importante en términos de biomasa y producción primaria en la zona costera de la región (Montecino & Quiroz, 2000). Los organismos fitoplanctónicos de tamaño pequeño normalmente no forman grandes florecimientos naturales en condiciones de surgencia costera y su dominancia en aguas frente a Coquimbo podría ser indicativa de una limitación para el crecimiento de diatomeas debido a la falta de nutrientes o debido a otras causas. En observaciones recientes (años 2011 a 2016), von Dassow & Díaz (datos no publicados) se han encontrado dos géneros de diatomeas formadores de cadenas que son frecuentemente dominantes en las zonas costeras, *Chaetoceros* y *Pseudo-nitzschia*.

*Pseudo-nitzschia* es un género excepcionalmente competitivo cuando hay pulsos de hierro en aguas pobres en este elemento debido a su mejor capacidad de asimilarlo y almacenarlo (Wells et al., 2005; Marchetti et al., 2009). Además, en la mayoría de los experimentos científicos de fertilización con hierro en los océanos, miembros de este género han resultado dominar o co-dominar en la comunidad de fitoplancton post-fertilización (de Baar et al., 2005). Una segunda característica relevante de *Pseudo-nitzschia* es que varias de sus especies son productoras de la neurotoxina ácido domoico, un veneno amnésico detectado en mariscos, peces, y mamíferos marinos (Liefer et al., 2013). La fertilización artificial o natural de hierro no estimula solamente el crecimiento de este género, sino también su toxicidad (Silver et al., 2010; Trick et al., 2010). En la zona de Coquimbo, *Pseudo-nitzschia australis* y *P. calliantha* son altos productores de toxina y han formado florecimientos inusuales en las costas de la IV región, llegando a muy altas abundancias (>200.000 células por litro). La toxina de estos componentes ha sido detectada en el piure (*Pyura chilensis*, Ascidiacea), un marisco frecuentemente consumido en Chile (Álvarez et al., 2009; López-Rivera et al., 2009). Otros miembros del género, como *P. pseudo-delicatissima* y *P. fraudulenta*, también han sido detectados en la zona (Álvarez et al., 2009).

Los datos no publicados del Dr. Torres sobre experimentos de enriquecimiento con hierro indican que esto puede estimular significativamente el aumento de diatomeas en la zona de Coquimbo, incluso de *Pseudo-nitzschia* (Fig. 6). El género *Leptocylindrus* también fue estimulado en estos experimentos y puede generar florecimientos de algas nocivas (FAN), causando mortalidad en peces cuando su abundancia es muy alta (Buschmann et al., 2006). En resumen, los antecedentes existentes sobre fitoplancton en la zona de Coquimbo son extremadamente escasos en comparación con otras zonas costeras en Chile. Sin embargo, las escasas observaciones existentes sugieren una alta precaución con iniciativas de fertilización artificial con hierro en forma directa sobre aguas costeras o

de transición costera en la zona dada la importante posibilidad de inducir florecimientos tóxicos de *Pseudo-nitzschia* u otro organismo generador de FANs.

#### **4. Recursos pesqueros en la IV Región como objetivo de la fertilización con hierro propuesta por OES**

*Resumen: No existen fundamentos científicos que indican que la fertilización del océano con hierro puede estimular stocks de peces. En la zona, las pesquerías son consideradas sobre-explotadas, y sus poblaciones no son limitadas por disponibilidad de alimentación. Las dos especies principales objetos de la propuesta de la empresa OES – el jurel y la anchoveta – son muy distintas pero ambas tienen un complejo comportamiento trófico y son altamente migratorias. Los stocks de ambos recursos frente a Chile son compartidos por distintas naciones, añadiendo otro aspecto de complejidad que será necesario considerar en evaluar una propuesta de fertilizar el océano con propósito de afectar estos stocks.*

Las poblaciones de los principales recursos pelágicos en el Sistema de Corrientes de Perú Chile están expuestas a la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos de gran escala, mesoescala, y submesoescala que caracteriza las zonas costeras, de transición costera, y netamente oceánicas en el Pacífico Sur-oriental (Yañez et al., 2008; Parada et al., 2013, 2017). Además, existen otros factores tales como la presión de pesca y las interacciones tróficas en sus distintas escalas espacio-temporales (Parada et al., 2013; Fig. 8). El SCPC, así como otros sistemas de borde oriental, se caracteriza por altos niveles de producción biológica y pesquera, la cual se considera comúnmente que es el resultado de una relación lineal y positiva entre la producción primaria (PP) y la de peces. Sin embargo, no es posible explicar esta relación sin agregar otras variables como el esfuerzo de pesca y las variaciones en las dinámicas tróficas y eficiencia en la transferencia de energía (Ryther, 1969; Frieland et al., 2012; Stock et al., 2017). Estos otros aspectos han sido relativamente inciertos en muchos casos, de allí que ha existido una tendencia a sobresimplificarlos o simplemente a obviarlos (Stock et al., 2017).

Los fundamentos de OES para realizar una fertilización con hierro en la IV Región, a modo de experimento, se basan en el supuesto de la relación lineal entre PP y producción pesquera, aduciendo que una disminución en la PP en décadas recientes y a escala global ha ido de la mano con una disminución de los desembarques de las principales pesquerías mundiales, entre las que están la anchoveta y el jurel en aguas frente a Chile y Perú ([www.oceaneos.org](http://www.oceaneos.org)). Estudios recientes (Boyce et al., 2010) han mostrado una disminución global de la biomasa de fitoplancton, basada en series de tiempo satelitales del principal pigmento fotosintético, la clorofila-a, en asociación con incrementos en la temperatura superficial del mar debido al calentamiento global. Sin embargo, otros estudios recientes sugieren que: i) la región frente a Chile central ha experimentado un enfriamiento en las últimas décadas asociado a un aumento en la intensidad de la surgencia costera (Aravena et al., 2014; Schneider et al., 2017), lo que a su vez ha generado cambios recientes en las comunidades planctónicas (Corredor-Acosta et al., 2015; Anabalón et al., 2016; Medellín-Mora et al., 2016); ii) los cambios en clorofila-a en relación al aumento de la temperatura en los océanos no son indicativos de cambios proporcionales en la productividad (Behrenfeld et al., 2015). En lo más relevante a la propuesta de OES, no existen evidencias publicadas sobre aumentos sostenidos de recursos pelágicos frente a fertilizaciones artificiales con hierro (caso remolino Haida en 2012, Canadá) y aquellas

relacionadas al efecto de eventos naturales sobre el plancton o peces son aún muy débiles (McKinnell, 2013; Parsons & Whitney, 2014; Xiu et al., 2014).

En las siguientes secciones se proporcionan antecedentes básicos sobre el conocimiento existente en relación a los principales recursos pesqueros pelágicos en la IV Región en el contexto de la propuesta y supuestos explicitados por OES para fertilizar con hierro una zona de remolinos de mesoescala en esa región con el objetivo de aumentar la biomasa o producción del fitoplancton y con ello, la producción pesquera. En el SCPC frente a la IV Región, los recursos pelágicos que hoy constituyen la mayor parte de los desembarques pesqueros (SubPesca, 2017) incluyen anchoveta (*Engraulis ringens*) y jurel (*Trachurus murphyi*), las cuales OES declara como especies objetivos. *Estas dos especies son muy distintas en sus hábitats*, con la anchoveta ubicada en la banda costera de surgencia (<100 km desde la costa) en un amplio rango latitudinal entre Perú y Chile centro-sur (Swartzman et al., 2008; Medina et al., 2015) mientras que el jurel se distribuye en una amplia zona subtropical del Pacífico Sur, entre Perú y Chile en el lado oriental (Vásquez et al., 2013) y Nueva Zelanda - Tasmania en el lado occidental (Parada et al., 2017).

### **Anchoveta**

Según informe de la Subsecretaría de Pesca (2017), en las regiones II y IV de Chile el stock de este recurso en las regiones III y IV se encuentra en estado de plena explotación, con probabilidad de caer en sobrepesca y sobrexplotación por efecto de mortalidad por pesca. Este informe señala, además, que la evaluación directa de biomasa total del recurso ha sido muy variable en el periodo 2006-2015, mostrando un aumento importante el año 2016 respecto a los años 2014 y 2015.

#### Comportamiento trófico

En la región costera del SCPC la anchoveta en estado adulto es capaz de alimentarse directamente de fitoplancton, componente numéricamente dominante (Medina et al., 2015), pero es principalmente carnívora en términos de biomasa, incluyendo copépodos y eufáusidos (Espinoza & Bertrand, 2008), sin diferencias latitudinales importantes. En estadio larval, el fitoplancton es parte de su dieta pero esencialmente está dominada por micro- a meso-zooplancton (copépodos, larvas de crustáceos) (Llanos-Rivera et al., 2004; Shen et al., 2017). *Esencialmente, la anchoveta muestra una gran plasticidad trófica en el SCH (Sistema de Corrientes de Humbolt), posiblemente asociada a las fuertes variaciones ambientales y en disponibilidad y calidad de alimento* (Espinoza & Bertrand, 2008; Medina et al., 2015).

#### Factores determinantes en su distribución y abundancia

Las épocas de desove de la anchoveta en el SCPC tienen dos máximos, uno en invierno (agosto-septiembre) y otro en verano (febrero-marzo) y, en ambos casos, se asocia con una máxima retención en la costa de huevos y larvas (Brochier et al., 2008; Hernandez-Santoro et al., 2013). Los factores ambientales bióticos y abióticos que influyen en su distribución y abundancia, varían de acuerdo a la escala espacial considerada (Bertrand et al., 2008). A nivel de submesoescala (pocos km), los procesos físicos como ondas internas y frontogénesis contribuyen a concentrar plancton en parches, lo que a su vez impacta la distribución de la anchoveta. A nivel de mesoescala (>50 km), la zona de surgencia activa y la profundidad de la oxiclina son relevantes en su distribución y agregación, mientras que a mayores escalas (>200 km) el tamaño del área productiva –extensión de la surgencia– es determinante. A escalas espaciales menores (<2 km), el comportamiento social de las poblaciones es relevante. Las estructuras dinámicas de submesoescala y mesoescala, como los remolinos existentes en la zona de transición costera, podrían proporcionar las condiciones apropiadas para la sobrevivencia de la anchoveta si en ellas hay un aumento de plancton en general

por advección desde la costa (transporte de Ekman) o por surgencia local (bombeo de Ekman). *Sin embargo, se ha evidenciado que estas estructuras, que normalmente se mueven hacia océano abierto, finalmente tienen un efecto negativo sobre el éxito del reclutamiento de pequeños peces pelágicos que normalmente son netamente costeros* (Niéto et al., 2014), como la anchoveta.

## **Jurel**

Según informe de la Subsecretaría de Pesca (2017), el stock de este recurso en las regiones III y IV (y en otras regiones y en aguas internacionales) se observa una tendencia sostenida desde 2010 al incremento del reclutamiento y de la biomasa desovante.

### Comportamiento trófico

En el caso del jurel, la alimentación de adultos es netamente carnívora, incluyendo principalmente necton pero especialmente eufáusidos, langostinos, y peces (Alegre et al., 2013; Orrego y Mendo, 2015), incluyendo la anchoveta, pero muestra una plasticidad trófica adaptada a las condiciones en las zona de alimentación (Medina y Arancibia, 2002). La dieta de larvas y juveniles de jurel es menos conocida pero una especie relacionada, *T. capensis* en el sistema de surgencia de Benguela, se alimenta principalmente de zooplancton (copépodos especialmente) (Geist et al., 2014).

### Factores determinantes en su distribución y abundancia

La época de desove se concentra en la primavera austral, entre octubre y diciembre (Gretchina et al., 1998; Oyarzún et al., 1998). *Se han descrito tres habitas principales:* (i) zona de crianza en la banda costera entre el sur de Perú y el norte de Chile (~15-30°S), (ii) zona de alimentación y reclutamiento en la zona oceánica frente a Chile centro-sur (30–40°S), y (iii) zona oceánica de desove frente a Chile central (~35-40°S), que se extiende por alrededor 1800 km durante la primavera (Vásquez et al., 2013; Parada et al., 2017). Además, el estudio de Parada et al. (2017) extiende la zona de desove y una potencial nueva zona de crianza a ~3500 km costa afuera, asociada a montes submarinos. Esta amplia distribución y alta migración del jurel ha sido una gran limitante para entender la estructura y dinámica poblacional, así como de los factores que las modulan, pero el modelamiento físico-biológico ha permitido proponer un modelo conceptual actualizado de la historia de vida del jurel (Parada et al., 2017), según se detalla en la Fig. 9. En general, *se desconocen los mecanismos por los cuales los hábitats del jurel están conectados entre sí* pero, esencialmente, ellos involucran procesos físicos de mesoescala y gran escala así como la alta capacidad migratoria del jurel (Vásquez et al., 2013; Ashford et al., 2011; Parada et al., 2017).

## **Consideraciones sobre el manejo de recursos pesqueros compartidos o transfronterizos**

El jurel es el mayor recurso pelágico de importancia comercial en la región del Pacífico Sur y, entre otros recursos marinos en aguas internacionales, ha motivado la formación de la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur (ORP; <https://www.sprfmo.int>), focalizada en la colaboración para la conservación y manejo de estos recursos. En el caso de la anchoveta, el recurso es parte de las aguas jurisdiccionales de Chile y Perú pero sus migraciones latitudinales lo configuran como un recurso compartido o transfronterizo (FAO, <http://www.fao.org/docrep/006/y4652e/y4652e0h.htm>). *En su conjunto, el manejo de las pesquerías de anchoveta y jurel tiene una componente importante de recursos compartidos entre distintas naciones y, por tanto, los esfuerzos internacionales de manejo y conservación son muy importantes.*

Asimismo, las observaciones y experimentos que se propongan en relación a estos recursos deberían ser consensuados apropiadamente entre los paneles científicos involucrados y con la participación de

equipos científicos calificados y multidisciplinarios, capaces de identificar y hacer un seguimiento apropiado de los recursos pelágicos en cuestión, así como de los efectos naturales o experimentales a los cuales se ven sujetos. *En este sentido, se desconocen las gestiones de OES sobre esta materia aunque entre su equipo científico asesor figuran especialistas pesqueros de Perú y Chile.* Cabe destacar que la Subsecretaría de Pesca en Chile ha declarado que el proyecto de OES no es de su interés particular (SubPesca; DP N°100, enero 2016).

### **1.3. Principales consideraciones y riesgos ambientales asociadas a propuestas de fertilización artificial con hierro en forma directa sobre aguas jurisdiccionales frente a Coquimbo.**

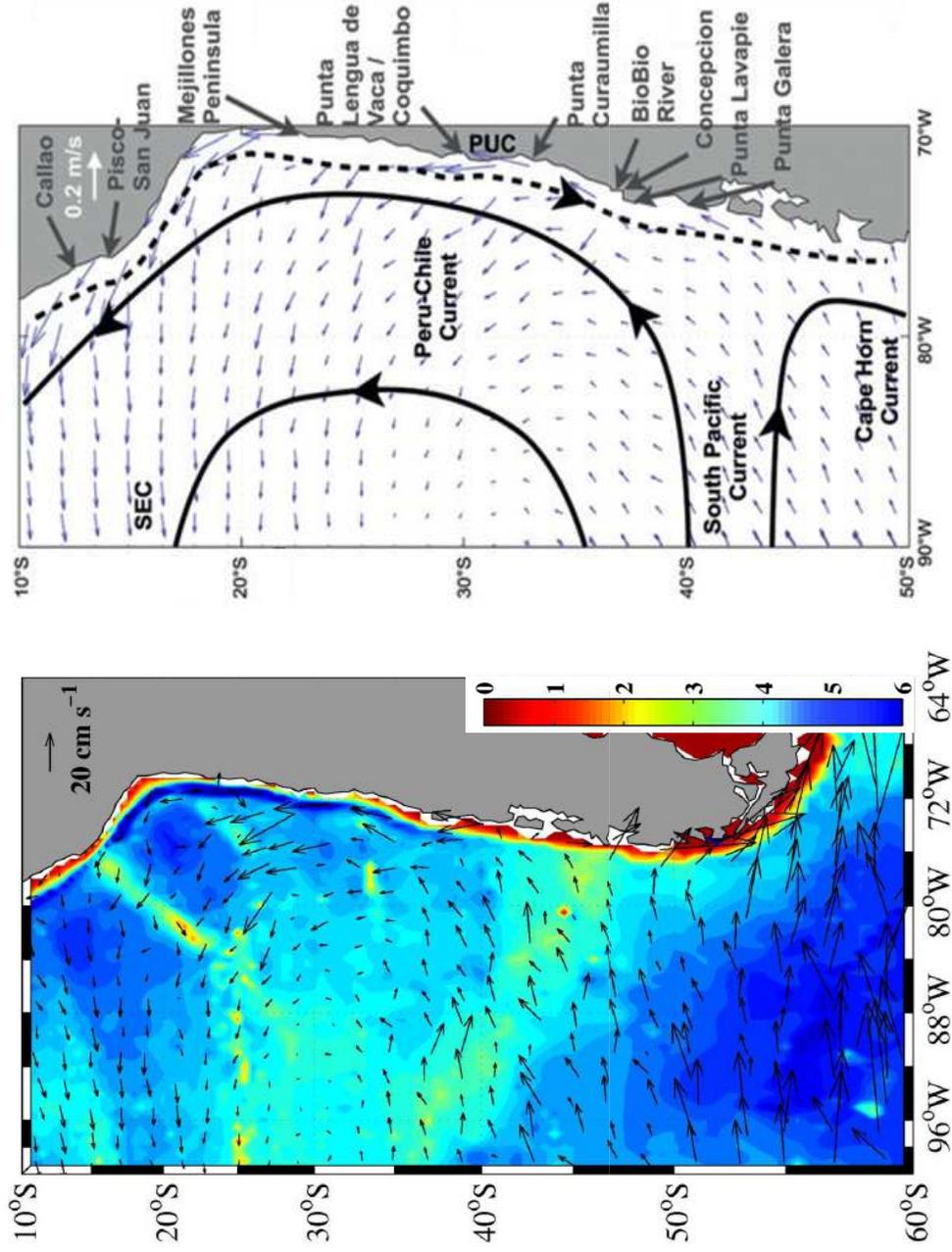
*Resumen: La fertilización propuesta por la empresa OES será más grande que cualquier fertilización con hierro hecho por científicos hasta la fecha. Además, en lugar de llevarse a cabo a más de mil kilómetros de la costa, tendría lugar en la zona transición costera-oceánica a solamente 130 km de la costa, y es muy probable que afectará ambientes de los recursos costeros. Los dos riesgos principales son la estimulación de un florecimiento de algas nocivos, y un incremento en la intensidad o extensión de aguas sub-óxicas que puede aumentar la mortalidad de peces e invertebrados. Además de pesquerías y actividades de acuicultura, la costa cerca de 30° S tiene alta importancia turística y como zona de conservación. Se debe considerar un enfoque precautorio antes de intervenir en los ecosistemas marinos vulnerables y valiosos de la zona.*

Varios riesgos han sido asociados al uso de la fertilización del océano por geo-ingeniería marina (Cullen & Boyd, 2008; Wallace et al., 2010; Jickells et al., 2005). Muchos de estos riesgos, como un aumento en la producción de gases de efecto invernadero, solamente serían importantes cuando la escala espacial y temporal de la fertilización fuese amplia (áreas más de cientos de km y continuamente por meses o años). Aquí nos enfocaremos solo en uno de esos riesgos y que pueden manifestarse en el corto plazo en la zona frente a Coquimbo. El riesgo más importante en una iniciativa de fertilización artificial con hierro en zonas costeras es la posibilidad de estimular un FAN tóxico. Fertilizaciones realizadas por científicos, tanto en botellas como directamente en el océano, indican que cantidades más de 10 veces menor que la cantidad de hierro propuesta por OES fueron suficientes para inducir altos niveles de ácido domoico, resultando en el cierre de pesquerías de moluscos y en la mortandad de depredadores de altos niveles tróficos, como aves, mamíferos y tortugas marinas. La fertilización científica más grande a la fecha (6,5 toneladas de sulfato de hierro) fue suficiente para crear un florecimiento en un área de 167 km<sup>2</sup> (Smetacek et al., 2012). Según OES, ellos han trabajado con la plataforma de desarrollo nanotecnológico 4DLabs (Universidad de Simon Fraser, Canadá) para producir partículas de hierro más eficiente en la estimulación del fitoplancton que el sulfato de hierro normalmente usado en experimentos científicos. Sin embargo, no existe información publicada sobre tal innovación, pero si llegase a producirse esta fertilización, el área potencialmente afectada por el desarrollo de un FAN tóxico podría ser aún más grande y el florecimiento más intenso que los reportados en los experimentos mencionados. Además, el desarrollo de un FAN en la zona sujeta a la fertilización por OES depende en forma importante de la comunidad de fitoplancton inicialmente encontrada en la zona de fertilización y de las condiciones de surgencia y actividad de mesoescala, lo que es muy variable y difícil de predecir en base a los antecedentes existentes para la región, aumentando el riesgo de los efectos de la fertilización propuesta. Investigaciones previas y extensas sobre la variabilidad en la estructura de comunidades fitoplanctónicas y su asociación con la variabilidad oceanográfica en el tiempo y el espacio permitirían definir y evaluar de mejor forma los beneficios y riesgos involucrados con este tipo de iniciativas científicas pero, en ningún caso, se podría asociar hoy a emprendimientos comerciales como los derivados de OES.

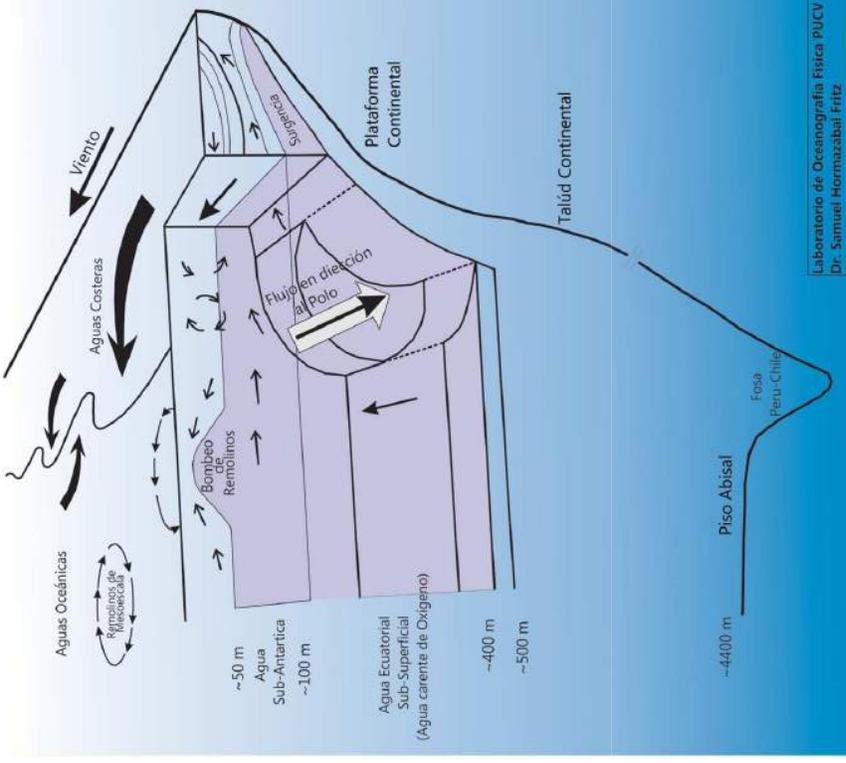
Además, la fertilización con hierro representa otro riesgo que es la posibilidad de incrementar la zona sub-superficial de bajo oxígeno frente a Coquimbo por efecto del aumento de fitoplancton. Esto

porque las tramas tróficas en zonas costeras y de transición costera generalmente aportan una parte importante de biomasa fitoplanctónica hacia aguas subsuperficiales, empobreciéndolas aún más en su contenido de oxígeno por los procesos de remineralización. En este sentido, la premisa de OES que el aumento de fitoplancton por aumento de hierro se traspase en la trama trófica hacia los peces es completamente cuestionable dado que tampoco se conoce en detalle esas dinámicas tróficas en el sistema pelágico y las exportaciones que se producen hacia sistemas bentónicos o hacia mar afuera.

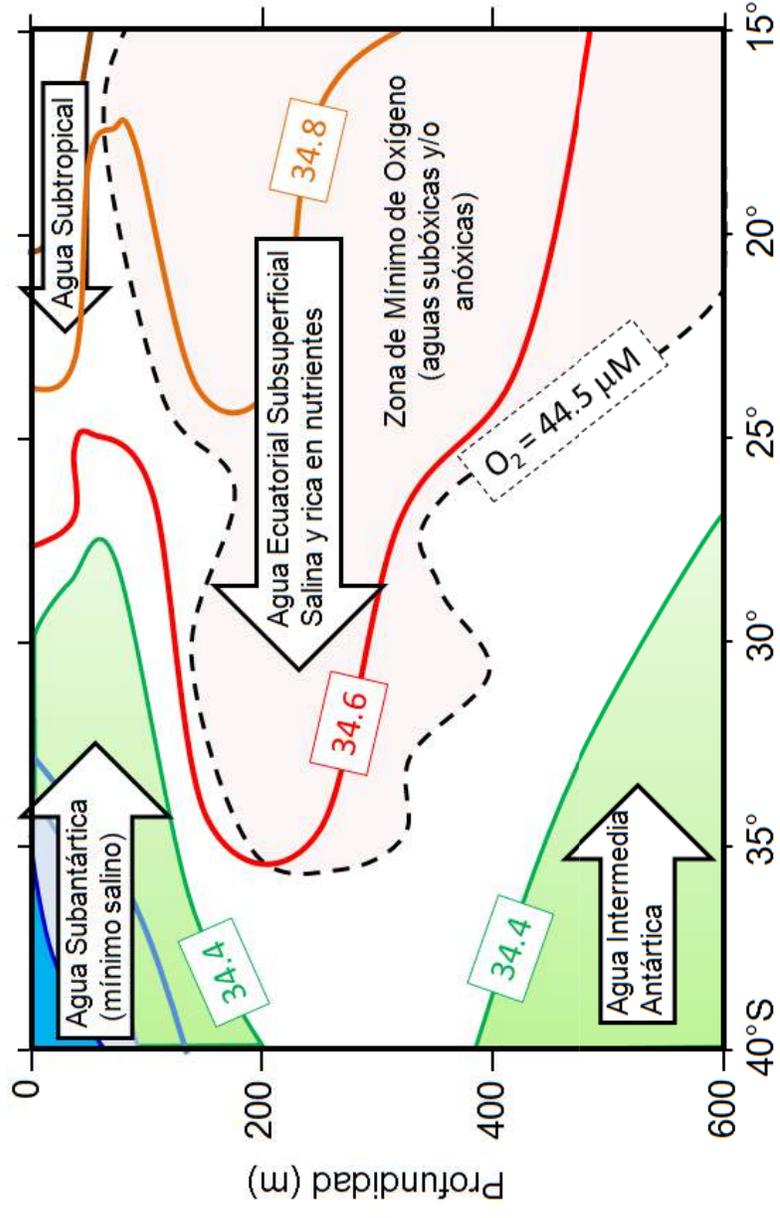
Finalmente, la Región de Coquimbo y el sur de la Región de Atacama son importantes para el turismo nacional e internacional y, con ello para la conservación de sus ecosistemas naturales. Por ejemplo, hay poblaciones importantes del Pingüino de Humboldt, Chungungo, y delfín nariz de botella en la Reserva Marina de Islas Choros-Damas (Región de Coquimbo) y la Reserva Marina de Isla Chañaral, ambos ubicados cerca de 29°S. No hay ninguna evidencia disponible que permita evitar o revertir los posibles efectos negativos asociados con la fertilización con hierro del océano sobre estas áreas y, por tanto, hay que tomar un enfoque precautorio antes de intervenir estos ecosistemas vulnerables y muy valiosos para el país.



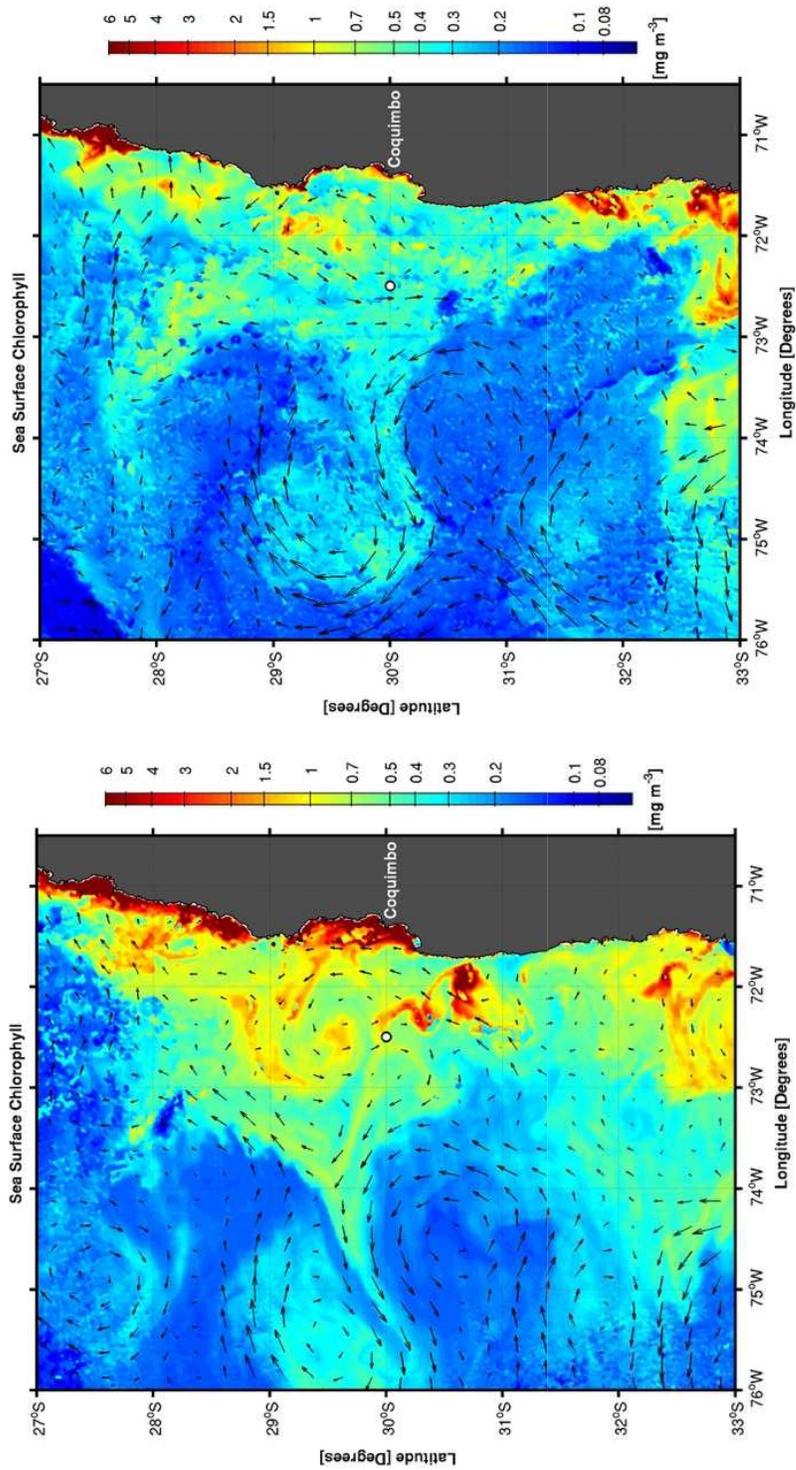
**Figura 1.** (A) Circulación superficial promedio en el Pacífico Suroriental estimada a partir de trayectorias de derivadores superficiales (~15 m) durante el periodo 1979-2003. Los derivadores son posicionados por satélite (tomado de Pizarro 2004, ver también Chaigneau & Pizarro 2005). La escala de colores muestra la profundidad en km. (B) Esquema de las principales corrientes marinas de la región (tomado de Strub et al., 2013).



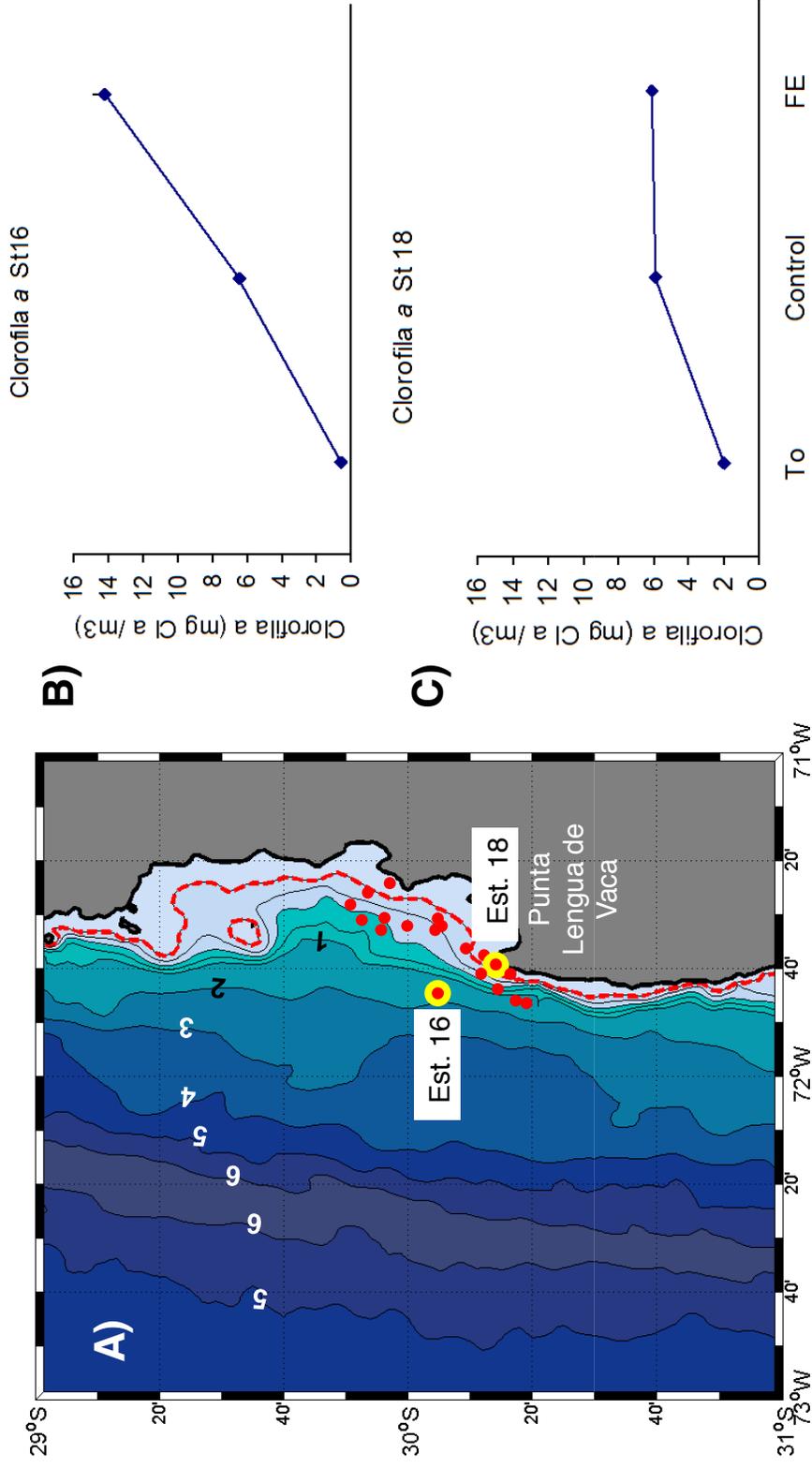
**Figura 2.** Esquema de los principales procesos físicos que tienen lugar en el océano frente a la costa central de Chile. La surgencia costera ocurre en respuesta a pulsos de viento del sur. El viento tiende a mover el agua superficial cerca de la costa hacia el norte, pero la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis) gira el agua hacia la izquierda alejándola de la costa. En respuesta, aguas subsuperficiales surgen junto a la costa. Las aguas que suben pueden ser Agua Subantártica (ASAA) o Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS), esta última masa de agua carece de oxígeno disuelto. Cerca de la costa la Corriente Subsuperficial de Perú-Chile transporta AESS hacia el sur. Cerca de la costa se forman vórtices, denominados remolinos de mesoescala, que llevan aguas costeras hacia el oeste. Mediante diversos mecanismos estos remolinos puede inducir surgencia en sus bordes e interior. Cerca de Coquimbo, la plataforma continental es tan estrecha que ASAA puede llegar a la superficie sin interactuar con el fondo marino, el cual es una fuente de hierro. Por eso la surgencia cerca de Coquimbo puede ser rica en nutrientes como nitrato, fosfato, y silice, pero pobre en hierro.



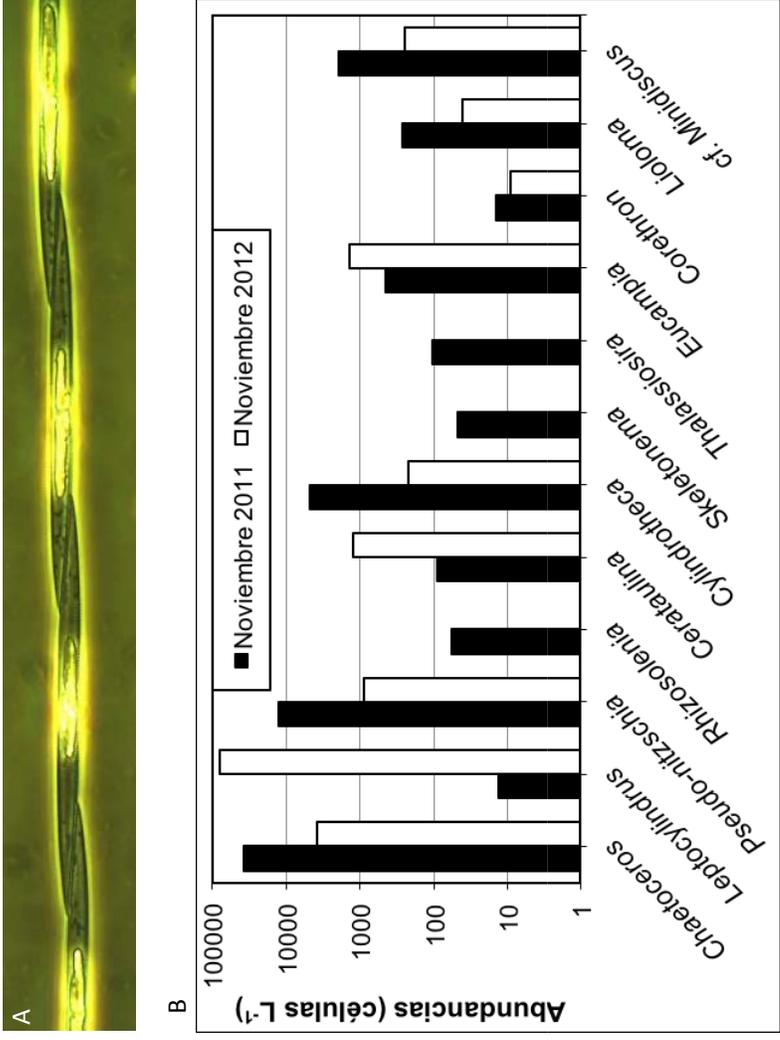
**Figura 3.** Distribución de salinidad y esquema de las distintas masas de agua y sus flujos en una sección meridional frente a la costa de Chile entre la superficie y 600 m de profundidad. La variabilidad asociada a ondas atrapadas a la costa, ondas de Rossby y remolinos de mesoescala (~100 km), así como perturbaciones de gran escala como El Niño y la variabilidad interdecadal, pueden modificar de manera importante la distribución horizontal y vertical de las masas de agua mostrada en la figura dentro de escalas de tiempo que se extienden de semanas a meses y años.



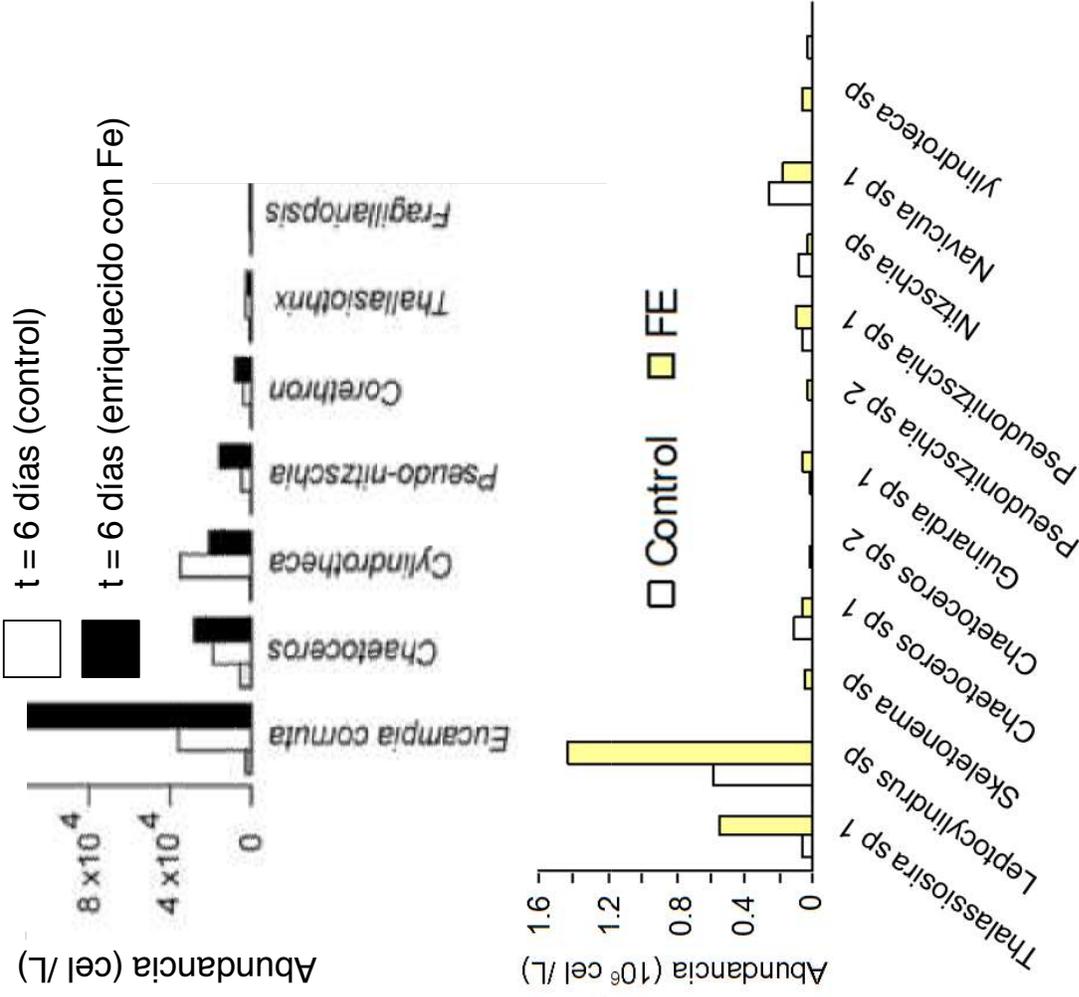
**Figura 4.** Imágenes satelitales de clorofila superficial (color) y corrientes geostroficas superficiales de mesoescala (fichas negras) calculadas mediante altimetría satelital. El panel de la izquierda corresponde al 10 de febrero de 2017 y el de la derecha al 11 de marzo de 2017. Los datos de clorofila fueron obtenidos de <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group) La información de clorofila corresponde al sensor "Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)". Los datos de altimetría y anomalías de las corrientes geostroficas fueron obtenidos de <http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>.



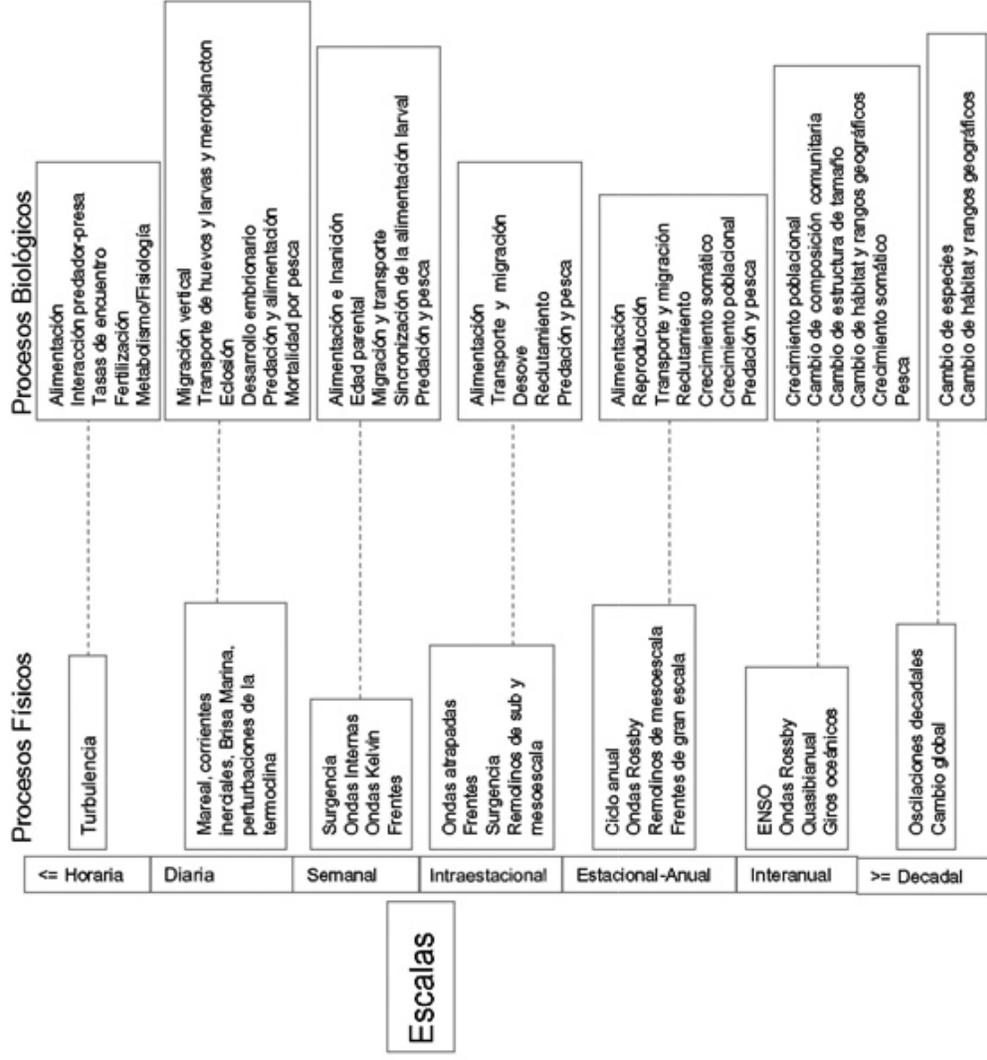
**Figura 5.** Ejemplo de experimentos en botellas demostrando que la limitación de fitoplancton por falta de hierro puede ocurrir en aguas fuera de la plataforma continental. El mapa en el panel (A) indica los sitios muestreados por Torres y Ampuero (2009; círculos rojos). La línea roja punteada indica la extensión de la plataforma continental (isobata de 200 m). La estación 16 está fuera de la plataforma continental y la estación 18 está sobre la plataforma continental (ambas se muestran con círculos amarillos). Las profundidades se indican en km, los contornos están cada 1 km (cada 200 m cerca de la costa). Los paneles (B) y (C) indican la concentración de clorofila inicial ( $T_0$ ) y a 5 o 7 días después de la adición de hierro inorgánico ( $Fe^{3+}$ ), el experimento Control consiste en botellas rellenas con agua de mar de las estaciones correspondientes. En la estación 16 la clorofila aumentó más en la botella enriquecida con hierro (marcada "FE" en el eje) que en el experimento Control, indicando que en esta estación la comunidad de fitoplancton estaba limitada por falta de hierro, mientras que en la estación 18 (panel C) no habría diferencias, indicando que en estas aguas no había falta de hierro que limitaba el crecimiento del fitoplancton. Estos datos no publicados están asociados a los experimentos publicados por Torres y Ampuero (2009).



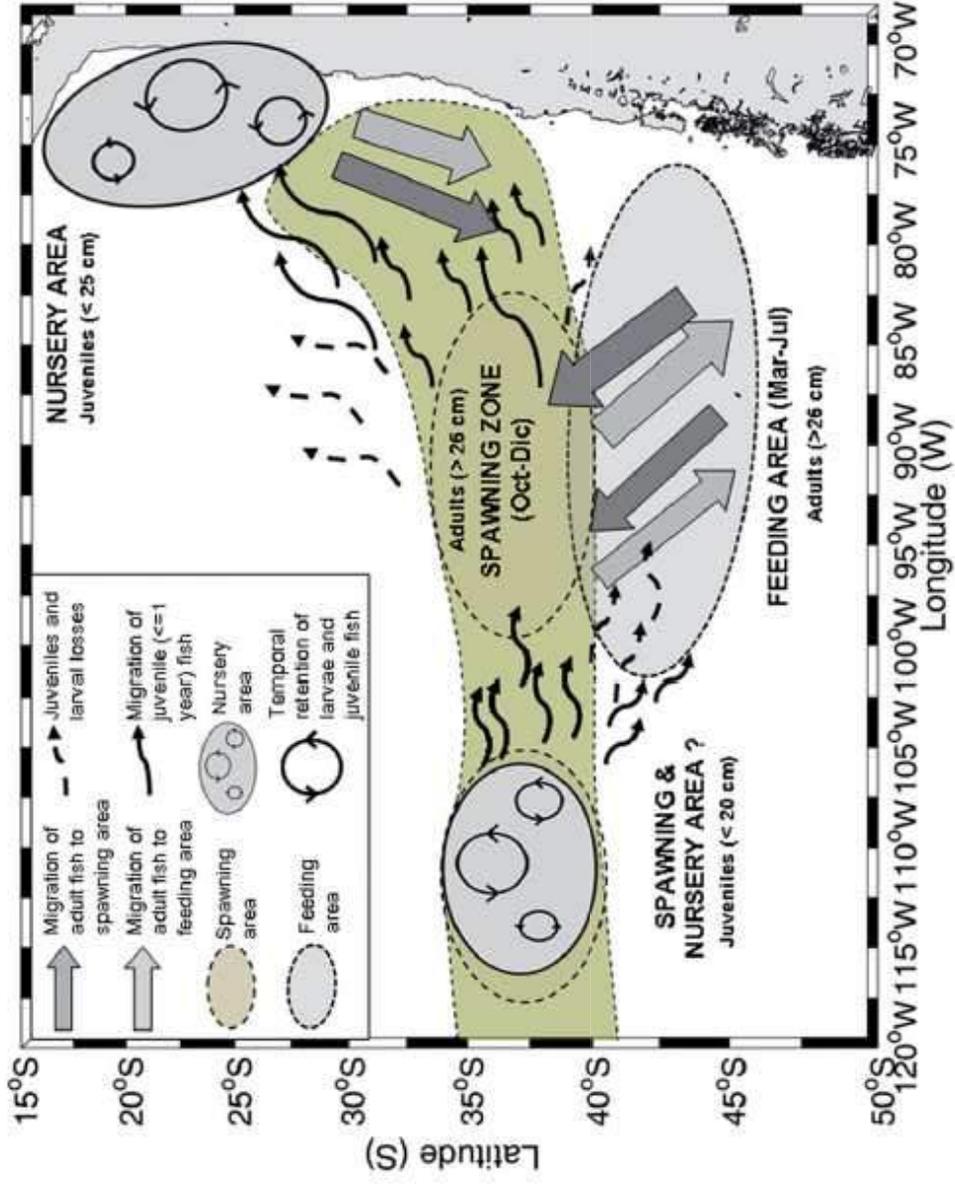
**Figura 6.** A) imagen representativa de una *Pseudo-nitzschia* sp. (probablemente *P.n. australis* o *P.n. caliantha*, según información de Dr. Adrian Marchetti). B) Promedio de abundancias de las principales diatomeas que habitan las aguas superficiales frente a la Bahía de Tongoy (Coquimbo ~30°S) durante noviembre 2011 (N muestras= 6) y 2012 (N muestras= 7). Notar que las abundancias están en escala logarítmica (datos no publicados de von Dassow y Diaz).



**Figura 7.** Crecimiento de diatomeas estimulado por adición de hierro en un experimento en botellas con aguas de surgencia al sur de Coquimbo (datos no publicados de Torres). A) Experimento en aguas limitadas por falta de hierro realizado el año 2002. Enriquecida con Fe corresponde a la botella enriquecida por 5 nM Fe<sup>3+</sup>. B) Experimento en aguas limitadas por Fe realizado el año 2007. "FE" significa enriquecido con 5 nM hierro Fe<sup>3+</sup>. En ambos casos el experimento control es una botella con agua de mar e incubada sin adición de Fe.



**Figura 8.** Escalas temporales, procesos físicos y biológicos asociados a la variabilidad en los recursos pesqueros pelágicos en el Pacífico Sur. Tomado de Parada et al. (2013).



**Figura 9.** Modelo conceptual de la distribución de la población de jurel en el Pacífico Sur-oriental: zonas de desove (spawning zone), alimentación (feeding area), y de crianza (nursery area). Las flechas indican: migraciones (flechas continuas), pérdidas del sistema (flechas quebradas), y áreas de retención de larvas y juveniles. Tomado de Parada et al. (2017).

## Bibliografía

- Alegre, A., Espinoza, P., Espino, M. 2013. Ecología trófica del jurel *Trachurus murphyi* en el Perú entre 1977 – 2011. *Revista Peruana de Biología*, número especial 20(1): 075-082.
- Álvarez, G., E. Uribe, S. Quijano-Scheggia, A. López-Rivera, C. Mariño, and J. Blanco. 2009. Domoic acid production by *Pseudo-nitzschia australis* and *Pseudo-nitzschia calliantha* isolated from North Chile. *Harmful Algae* 8: 938–945. doi:10.1016/j.hal.2009.05.005
- Anabalón, V., C. E. Morales, R. Escribano, and M. Angélica Varas. 2007. The contribution of nano- and micro-planktonic assemblages in the surface layer (0-30 m) under different hydrographic conditions in the upwelling area off Concepción, central Chile. *Prog. Oceanogr.* 75: 396–414. doi:10.1016/j.pocean.2007.08.023
- Anabalón, V., C. E. Morales, H. E. González, and others. 2016. Micro-phytoplankton community structure in the coastal upwelling zone off Concepción (central Chile): Annual and inter-annual fluctuations in a highly dynamic environment. *Prog. Oceanogr.* 149: 174–188. doi:10.1016/j.pocean.2016.10.011
- Aravena, G., Broitman, B., Stenseth, N.C. 2014. Twelve Years of Change in Coastal Upwelling along the Central Northern Coast of Chile: Spatially Heterogeneous Responses to Climatic Variability. *PLoS ONE* 9(2): e90276. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090276>
- Ashford, J., Serra, R., Saavedra, J. C., Letelier, J. 2011. Otolith chemistry indicates large-scale connectivity in Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*), a highly mobile species in the Southern Pacific Ocean. *Fisheries Research* 107: 291–299.
- de Baar, H. J. W., P. W. Boyd, K. H. Coale, and others. 2005. Synthesis of iron fertilization experiments: From the iron age in the age of enlightenment. *J. Geophys. Res. C Ocean.* 110: 1–24. doi:10.1029/2004JC002601.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Boss, E.S., Westberry, T.K., Graff, J.R., Halsey, K.H., Milligan, A.J., Siegel, D.A., Brown, M.B. 2015. Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. *Nature*, DOI: 10.1038/NCLIMATE2838.
- Bertrand, A., Gerlotto, F., Bertrand, S., Gutiérrez, M., Alza, L., Chipollini, A., Díaz, E., Espinoza, P., Ledesma, J., Quesquén, R., Peraltilla, S., Chavez, F. 2008. Schooling behaviour and environmental forcing in relation to anchoveta distribution: An analysis across multiple spatial scales. *Progress in Oceanography* 79, 264–277. Doi: 10.1016/j.pocean.2008.10.018
- Bertrand, A., Ballon, M., & Chaigneau, A. 2010. Acoustic observation of living organisms reveals the upper limit of the oxygen minimum zone. *PLoS One*, 5(4), e10330.
- Biller, D. V., and K. W. Bruland. 2014. The central California Current transition zone: A broad region exhibiting evidence for iron limitation. *Prog. Oceanogr.* 120: 370–382. doi:10.1016/j.pocean.2013.11.002.
- Bonnet, S., Guieu, C., Bruyant, F., Prášil, O., Van Wambeke, F., Raimbault, P., Moutin, T., Grob, C., Gorbunov, M.Y., Zehr, J.P. and Masquelier, S.M., 2008. Nutrient limitation of primary productivity in the Southeast Pacific (BIOSPE cruise). *Biogeosciences*. 5: 215-225.
- Boyce, D. G., Lewis, M. L., Worm, B. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591-596.
- Brandhorst, W. 1974. Condiciones oceanográficas estivales frente a la costa de Chile. *Rev. Biol. Mar.* 14, 45-84.

- Brochier, T, Lett, C, Tam, J, Fréon, P, Colas, F, Ayón, P. (2008). An individual-based model study of anchovy early life history in the northern Humboldt Current system. *Progress in Oceanography* 79, 313–325.
- Bruland, K. W., E. L. Rue, and G. J. Smith. 2001. Iron and macronutrients in California coastal upwelling regimes: Implications for diatom blooms. *Limnol. Oceanogr.* 46: 1661–1674. doi:10.4319/lo.2001.46.7.1661.
- Bruland, K. W., E. L. Rue, G. J. Smith, and G. R. DiTullio. 2005. Iron, macronutrients and diatom blooms in the Peru upwelling regime: Brown and blue waters of Peru. *Mar. Chem.* 93: 81–103. doi:10.1016/j.marchem.2004.06.011.
- Buschmann, A. H., V. A. Riquelme, M. C. Hernández-González, and others. 2006. A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific. *ICES J. Mar. Sci.* 63: 1338–1345. doi:10.1016/j.icesjms.2006.04.021.
- Chaigneau, A., & Pizarro, O. 2005. Eddy characteristics in the eastern South Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C6).
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., & Samelson, R. M. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2), 167-216.
- Cornejo D'Ottone, M., Bravo, L., Ramos, M., Pizarro, O., Karstensen, J., Gallegos, M., Correa-Ramirez, M., Silva, N., Farias, L., & Karp-Boss, L. 2016. Biogeochemical characteristics of a long-lived anticyclonic eddy in the eastern South Pacific Ocean. *Biogeosciences (BG)*, 13: 2971-2979.
- Correa-Ramirez, M. A., Hormazabal, S., & Yuras, G. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29–39 S). *Geophysical Research Letters*, 34(12): L12604.
- Correa-Ramirez, M. A., S. E. Hormazabal, and C. E. Morales. 2012. Spatial patterns of annual and interannual surface chlorophyll-a variability in the Peru-Chile Current System. *Prog. Oceanogr.* 92–95: 8–17. doi:10.1016/j.pocean.2011.07.008.
- Corredor-Acosta, J.A., Morales, C.E., Hormazabal, S., Andrade, I., Correa-Ramirez, M.A. 2015. Phytoplankton phenology in the coastal upwelling region off central-southern Chile (35°S–38°S): Time space variability, coupling to environmental factors, and sources of uncertainty in the estimates. *Journal of Geophysical Research, Oceans*. 120(2), 813-831. DOI/URL: <http://dx.doi.org/10.1002/2014JC010330>.
- Cullen, J. J., and P. W. Boyd. 2008. Predicting and verifying the intended and unintended consequences of large-scale ocean iron fertilization. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 364: 295–301. doi:10.3354/meps07551.
- Daneri, G., V. Dellarossa, R. Quiñones, B. Jacob, P. Montero, and O. Ulloa. 2000. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 197: 41–49. doi:10.3354/meps197041.
- Escribano, R., Hidalgo P., & Schneider W. (2016). El zooplancton como indicador del impacto del cambio climático sobre los ecosistemas de surgencia costera Boetin N°2, Instituto Milenio de Oceanografía.
- Espinoza, P., Bertrand, A., 2008. Revising anchovy's (*Engraulis ringens*) trophic niche and ecological role reveals its plasticity and lead to a new vision of the Humboldt Current system. *Progress in Oceanography*. 79: 215-227. doi:10.1016/j.pocean.2008.10.022.
- Frieland, K.D., Stock, C.A., Drinkwater, K.F., Link, J.S., Leaf, R.T., Shank, B.V., Rose, J.M., Pilskaln, C.H., Fogarty, M.J. 2012. Pathways between Primary Production and Fisheries Yields of Large Marine Ecosystems. *PLoS ONE* 7(1), e28945. doi:10.1371/journal.pone.0028945.
- Geist, S.J., Kunzmann, A., Verheye, H.M., Eggert, A., Schukat, A., Ekau, W. 2014. Distribution, feeding behaviour, and condition of Cape horse mackerel early life stages, *Trachurus capensis*, under

- different environmental conditions in the northern Benguela upwelling ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*, 72: 543–557.
- Gretchina, A.S., Nuñez, S., Arcos, D. 1998. Biología reproductiva del jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*) en el Pacífico sur. En: *Biología y ecología del jurel en aguas chilenas*, pp. 77–79. Ed. D. Arcos. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, 216 pp.
- Gruber, N., Lachkar, Z., Frenzel, H., Marchesiello, P., Münnich, M., McWilliams, J. C., & Plattner, G. K. 2011. Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems. *Nature Geoscience*, 4: 787–792.
- Hernández-Miranda, E., R. A. Quiñones, G. Aedo, A. Valenzuela, N. Mermoud, C. Román, and F. Yañez. 2010. A major fish stranding caused by a natural hypoxic event in a shallow bay of the eastern South Pacific Ocean. *J. Fish Biol.* 76: 1543–1564. doi:10.1111/j.1095-8649.2010.02580.
- Hernández-Santoro, C., Pérez-Mora, G., Díaz-Ramos, E., Böhm-Stoffel, G. 2013. Análisis de indicadores macro y microscópicos para establecer el periodo de máxima intensidad de desove de la anchoveta *Engraulis ringens* en la zona norte de Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 48(3), 451-457.
- Hormazabal, S., Shaffer, G. and Leth, O. 2004 Coastal transition zone off Chile, *J. Geophys. Res. C Ocean*. 109: C01021, doi:10.1029/2003JC001956.
- Hormazabal, S., Combes, V., Morales, C. E., Correa-Ramirez, M. A., Di Lorenzo, E., & Nuñez, S. 2013. Intrathermocline eddies in the coastal transition zone off central Chile (31–41 S). *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 118: 4811-4821.
- Hutchins, D. A., G. R. DiTullio, Y. Zhang, and K. W. Bruland. 1998. An iron limitation mosaic in the California upwelling regime. *Limnol. Oceanogr.* 43: 1037–1054. doi:10.4319/lo.1998.43.6.1037.
- Hutchins, D. A., Hare, C. E., Weaver, R. S., Zhang, Y., Firme, G. F., DiTullio, G. R., Alm, M. B., Riseman, S. F., Maucher, J. M., Geesey, M. E., Trick, C. G., Smith, G. J., Rue, E. L., Conn, J. and Bruland, K. W. 2002. Phytoplankton iron limitation in the Humboldt Current and Peru Upwelling, *Limnol. Oceanogr.*, 47(4), 997–1011, doi:10.4319/lo.2002.47.4.0997.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J. J., Boyd, P. W., Duce, R. A., Hunter, K. A., Kawahata, H., Kubilay, N., Liss, P. S., Mahowald, N., Prospero, J. M., Ridgwell, A. J., Tegen, I. and Torres, R. 2005. Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate, *Science*. 308: 67–71.
- Jickells, T. and Moore, C. M. 2015. The Importance of Atmospheric Deposition for Ocean Productivity, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 46:481–501. doi:10.1146/annurev-ecolsys-112414-054118.
- Letelier, J., Pizarro, O., & Nuñez, S. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 114: C12009, doi:10.1029/2008JC005171.
- Liefer, J. D., A. Robertson, H. L. MacIntyre, W. L. Smith, and C. P. Dorsey. 2013. Characterization of a toxic *Pseudo-nitzschia* spp. bloom in the Northern Gulf of Mexico associated with domoic acid accumulation in fish. *Harmful Algae* 26: 20–32.
- López-Rivera, A., M. Pinto, A. Insinilla, and others. 2009. The occurrence of domoic acid linked to a toxic diatom bloom in a new potential vector: The tunicate *Pyura chilensis* (piure). *Toxicon* 54: 754–762. doi:10.1016/j.toxicon.2009.05.033.
- Llanos-Rivera, A., Herrera, G., Bernal, P. 2004. Food selective and diet overlap in larvae of Clupeiform species from central Chile. *Cahiers de Biologie Marine*, 45: 1-8.
- Mahadevan, A. 2016. The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual review of marine science*. 8: 161-184.

- Marchetti, A., M. S. Parker, L. P. Moccia, and others. 2009. Ferritin is used for iron storage in bloom-forming marine pennate diatoms. *Nature* 457: 467–470. doi:10.1038/nature07539
- Margalef, R. 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta* 134: 493–509.
- McGillicuddy, D. J., Anderson, L. A., Bates, N. R., Bibby, T., Buesseler, K. O., Carlson, C. A., ... & Hansell, D. A. (2007). Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms. *Science*, 316(5827), 1021-1026.
- McGillicuddy, D. J. 2016. Mechanisms of Physical- Interaction at the Oceanic Mesoscale. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 8: 125–159. doi:10.1146/annurev-marine-010814-015606.
- McKinnell, S. 2013. Challenges for the Kasatoshi volcano hypothesis as the cause of a large return of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) to the Fraser River in 2010. *Fisheries Oceanography* 22(4): 337-344.
- McWilliams, J. C. 2016. Submesoscale currents in the ocean. In *Proc. R. Soc. A.* 472: 20160117. DOI: 10.1098/rspa.2016.0117.
- Medellín-Mora, J., Escribano, R., Schneider, W., 2016. Community response of zooplankton to oceanographic changes (2002-2012) in the central/southern upwelling system of Chile. *Progress in Oceanography*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2016.01.005>.
- Medina, M., Herrera, L., Castillo, J., Jaque1, J., Pizarro, N. 2015. Alimentación de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en el norte de Chile (18°25'-25°40'S) en diciembre de 2010. *Latin-American Journal of Aquatic Research*, 43(1): 46-58.
- Medina M., Arancibia. H. 2002. Dinámica trófica del jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*) en el norte de Chile. *Investigaciones Marinas, Valparaiso* 30(1): 45-55.
- Montecino, V., G. Pizarro, and D. Quiroz. 1998. Primary production off the Chilean coast, p. 69–76. In G. Hollowary, P. Muller, and D. Henderson [eds.], *Proceedings Aha Huliko'a Hawaiian Winter Workshop: Biotic impact of extratropical Climate variability in the Pacific*. University of Hawaii at Manoa.
- Montecino, V., and D. Quiroz. 2000. Specific primary production and phytoplankton cell size structure in an upwelling area off the coast of Chile (30°S). *Aquatic Sciences-Research Across Boundaries*. 62: 364–380. doi:10.1007/PL00001341.
- Montecino, V., P. T. Strub, F. Chavez, A. Thomas, J. Tarazona, and T. Baumgartner. 2006. Chapter 10. Bio-physical interactions off Western South-America, p. 329–390. In A.R. Robinson and K.H. Brink [eds.], *The Sea. The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses*. Harvard University Press.
- Moore, C. M., M. M. Mills, K. R. Arrigo, and others. 2013. Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nat. Geosci.* 6: 701–710. doi:10.1038/ngeo1765.
- Morales, C. E., González, H. E., Hormazabal, S. E., Yuras, G., Letelier, J., & Castro, L. R. 2007. The distribution of chlorophyll-a and dominant planktonic components in the coastal transition zone off Concepción, central Chile, during different oceanographic conditions. *Progress in Oceanography*. 75: 452-469.
- Morales, C. E., and V. Anabalón. 2012. Phytoplankton biomass and microbial abundances during the spring upwelling season in the coastal area off Concepción, central-southern Chile: Variability around a time series station. *Prog. Oceanogr.* 92–95: 81–91. doi:10.1016/j.pocean.2011.07.004.
- Nagai, T., Gruber, N., Frenzel, H., Lachkar, Z., McWilliams, J. C. and Plattner, G.-K. 2015. Dominant role of eddies and filaments in the offshore transport of carbon and nutrients in the California Current System, *J. Geophys. Res. Ocean.* 120: 5318–5341, doi:10.1002/2015JC010889.

- Nieto, K., McClatchie, S., Weber, E.D., Lennert-Cody, C.E. 2014. Effect of mesoscale eddies and streamers on sardine spawning habitat and recruitment success off Southern and central California. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 119, 6330–6339, doi:10.1002/2014JC010251.
- Orrego, H., Mendo, J. 2015. Hábitos alimenticios del jurel *Trachurus murphyi* (Nichols) en la zona norcentral del mar peruano. *Ecología Aplicada*, 14(2) 103-113.
- Oyarzún, C., Chong, J., Malagueño, M. 1998. Fenología reproductiva en el jurel, *Trachurus symmetricus* (Ayres, 1855) (Perciformes, Carangidae) en el área de Talcahuano-Chile: 1982–1984. In *Biología y ecología del jurel en aguas chilenas*, pp. 67–75. Ed. D. Arcos. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, 216 pp.
- Parada, C., Yannicelli, B., Hormazábal, S., Vásquez, S., Porobić, J., Ernst, B., Gatica, C., Arteaga, M., Montecinos, A., Núñez, S., & Gretchina, A. 2013. Variabilidad ambiental y recursos pesqueros en el Pacífico suroriental: estado de la investigación y desafíos para el manejo pesquero. *Latin American journal of aquatic research*, 41(1), 1-28.
- Parada, C., Gretchina, A., Vasquez, S., Belmadani, A., Combes, V., Ernst, B., Di Lorenzo, E., Porobic, J., Sepulveda, A. 2017. Expanding the conceptual framework of the spatial population structure and life history of jack mackerel in the southeastern Pacific: Oceanic seamount region as potential spawning/nursery habitat. *ICES Journal of Marine Sciences* doi:10.1093/icesjms/fsx065.
- Parsons, T., Whitney, F. 2014. On the effect of the Kasatoshi volcano on the large return of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) to the Fraser River in 2010. *Fisheries Research* 23(1), 101-102.
- Pizarro O., 2004. Observing the Peru-Chile Current System. Editorial, COPAS Newsletters. November 2004. 1-2.
- Rabalais, N. N., R. J. Díaz, L. A. Levin, R. E. Turner, D. Gilbert, and J. Zhang. 2010. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. *Biogeosciences* 7: 585–619.
- Rutllant, J. O. S. É., & Montecino, V. 2002. Multiscale upwelling forcing cycles and biological response off north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 75: 217-231.
- Rutllant, J. A., Rosenbluth, B., & Hormazabal, S. 2004. Intraseasonal variability of wind-forced coastal upwelling off central Chile (30 S). *Continental Shelf Research*. 24: 789-804.
- Ryther, J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* 166(3901): 72–76.
- Schneider, W., Fuenzalida, R., Rodríguez-Rubio, E., Garcés-Vargas, J., & Bravo, L. (2003). Characteristics and formation of eastern South Pacific intermediate water. *Geophysical Research Letters*, 30: 1581. doi:10.1029/2003GL017086.
- Schneider, W., Donoso, D., Garcés-Vargas, J., Escribano, R. 2017. Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High. *Progress in Oceanography*. DOI: 10.1016/j.pocean.2016.11.004.
- Shaffer, G., Hormazabal, S., Pizarro, O. and Salinas, S., 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C12): 29951-29961.
- Shaffer, G., S. Hormazabal, O. Pizarro, and M. Ramos. 2004. Circulation and variability in the Chile Basin, *Deep Sea Research, Part I*, 51(10): 1367-1386.
- Shen, S.G., Thompson, A.R., Correa, J., Fietzek, P., Ayón, P., Checkley, Jr. D.M. 2017 Spatial patterns of Anchoveta (*Engraulis ringens*) eggs and larvae in relation to pCO<sub>2</sub> in the Peruvian upwelling system. *Proc. R. Soc. B* 284: 20170509. DOI: 10.1098/rspb.2017.0509.

- Silva, N., Rojas, N. and Fedele, A. 2009. Deep-Sea Research II Water masses in the Humboldt Current System: Properties , distribution , and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile, Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr. 56: 1004–1020, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.013.
- Silver, M. W., S. Bargu, S. L. Coale, and others. 2010. Toxic diatoms and domoic acid in natural and iron enriched waters of the oceanic Pacific. Proc. Natl. Acad. Sci. 107: 20762–20767. doi:10.1073/pnas.1006968107.
- Smetacek, V., C. Klaas, V. H. Strass, and others. 2012. Deep carbon export from a Southern Ocean iron-fertilized diatom bloom. Nature 487: 313–319. doi:10.1038/nature11229
- Stock, C.A., John, J.G., Rykaczewski, R.R., Asch, R.G., Cheung, W.W.L., Dunne, J.P., Friedland, K.D., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J.L., Watson, R.A. 2017. Reconciling fisheries catch and ocean productivity. Proceedings of the National Academy of Science. DOI: doi:10.1073/pnas.1610238114.
- Strub, P.T., Mesias, J.M., Montecino, V., Ruttlant, J., Salinas, S., 1998. Coastal ocean circulation of western South America. In: Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.), The Sea, Vol. 11. The Global Coastal Ocean—Regional Studies and Syntheses. John Wiley and Sons, New York, pp. 273–313.
- Strub, P. T., Combes, V., Shillington, F. A., & Pizarro, O. 2013. Currents and processes along the eastern boundaries. Ocean Circulation and Climate, a 21st century perspective, 339-384.
- SubPesca. 2016. Informe Sectorial de Pesca y Acuicultura 2016- [www.subpesca.cl](http://www.subpesca.cl)
- SubPesca. 2017. Estado de Situación de las principales pesquerías chilenas, año 2016 ([www.subpesca.cl/portal/618/articles-96618\\_recurso\\_1.pdf](http://www.subpesca.cl/portal/618/articles-96618_recurso_1.pdf))
- Swartzman, G., Bertrand, A., Gutiérrez, M., Bertrand, S., & Vasquez, L. 2008. The relationship of anchovy and sardine to water masses in the Peruvian Humboldt Current System from 1983 to 2005. Progress in Oceanography, 79(2), 228-237.
- Tomczak, M., & Godfrey, J. S. (1994). Regional oceanography: an introduction. Pergamon. 422 pp.
- Torres, R., Turner, D. R., Silva, N., & Ruttlant, J. 1999. High short-term variability of CO<sub>2</sub> fluxes during an upwelling event off the Chilean coast at 30° S. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 46: 1161-1179.
- Torres, R., & P. Ampuero. 2009. Strong CO<sub>2</sub> outgassing from high nutrient low chlorophyll coastal waters off central Chile (30°S): The role of dissolved iron. Estuar. Coast. Shelf Sci. 83: 126–132. doi:10.1016/j.ecss.2009.02.030.
- Torres, R. F. 1995. Condiciones oceanográficas de surgencia y baja concentración de clorofila frente a Coquimbo-Chile (Lat. 30° S) durante 1992-1994. Tesis de Magister, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 123 pp.
- Trick, C. G., B. D. Bill, W. P. Cochlan, M. L. Wells, V. L. Trainer, and L. D. Pickell. 2010. Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas. Proc. Natl. Acad. Sci. 107: 5887–5892. doi:10.1073/pnas.0910579107.
- Vásquez, S., Correa-Ramírez, M., Parada, C., Sepúlveda, A. 2013. Influence of oceanographic processes on jack mackerel (*Trachurus murphyi*) larval distribution and population structure off Chile. ICES Journal of Marine Sciences 70: 1097–1107.
- Wallace, D., C. Law, P. Boyd, and others. 2010. Ocean fertilization: A scientific summary for policy makers, IOC/UNESCO, Paris (IOC/BRO/2010/2).
- Wells, M. L., C. G. Trick, W. P. Cochlan, M. P. Hughes, and V. L. Trainer. 2005. Domoic acid: The synergy of iron, copper, and the toxicity of diatoms. Limnol. Oceanogr. 50: 1908–1917. doi:10.4319/lo.2005.50.6.1908.

- Yáñez, E., Hormazábal, S., Silva, C., Montecinos, A., Barbieri, M.A., Valdenegro, A., Órdenes, A., Gómez, F. 2008. Coupling between the environment and the pelagic resources exploited off northern Chile: ecosystem indicators and a conceptual model. *Latin-American Journal of Aquatic Research*, 36(2): 159-181.
- Yuras, G., O. Ulloa, and S. Hormazábal. 2005. On the annual cycle of coastal and open ocean satellite chlorophyll off Chile (18°-40°s). *Geophys. Res. Lett.* 32: 1–4. doi:10.1029/2005GL023946.
- Xiu, P., Thomas, A.C., Chai, F. 2014. Satellite bio-optical and altimeter comparisons of phytoplankton blooms induced by natural and artificial iron addition in the Gulf of Alaska. *Remote Sensing of Environment* 145, 38-46.
- Zhang, Z., Wang, W., Qiu, B. 2014. Oceanic mass transport by mesoscale eddies. *Science*, 345: 322-324.