

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Ventana ambiental óptima del reclutamiento de anchoveta (*Engraulis ringens*) en el stock sur de Perú y norte de Chile

Proyecto para optar al Título de Ingeniero Pesquero  
por  
Mical Andrea Reyes Medling

Valparaíso  
2012

**COMISIÓN DEL PROYECTO DE TÍTULO:**

Profesor Guía : Dr. Eleuterio Yáñez Rodríguez

Profesor : Dra. María Ángela Barbieri Bellolio

Investigador : Ing. Pesq. Francisco Plaza Vega

## **INFORME SOBRE EL PROYECTO**

## **AUTORIZACIÓN DE USO**

Al presentar este proyecto como último requisito para la obtención del título de Ingeniero Pesquero, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además, reproducciones parciales o totales de este proyecto sólo con fines académicos.

---

Mical Andrea Reyes Medling

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, Juan e Iskra,  
por su amor incondicional.*

*A mi hermana Iskrita,  
por ser un pilar y ejemplo en mi vida.  
Y porque sé que siempre estará a mi lado.*

*A Javier Legua,  
por su apoyo y entrega sin condición.*

## AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a mi familia, y a todas aquellas personas que confiaron en mí, por su incondicional apoyo, paciencia y comprensión durante esta importante etapa de mi vida.

A mi padre Juan Reyes, por inculcar el espíritu de superación y cultivar mis fortalezas. A mi madre Iskra Medling, por creer incondicionalmente en mis capacidades y enseñarme a disfrutar de las cosas simples de la vida.

A mi hermana Iskra Reyes, por su amor constante y por su amistad presente. A mis abuelos Juan Reyes y Horis Díaz, por vibrar con cada pequeño logro en mi vida y por sobre todo por estar siempre.

A Javier Legua, por la pureza de su amor y acompañarme en el camino de la vida.

Mis agradecimientos a los miembros del Comité de Tesis por sus valiosos comentarios y sugerencias. A mi profesor guía, Dr. Eleuterio Yáñez, por el apoyo académico, entusiasmo y colaboración al desarrollo de este proyecto. A la Dra. María Ángela Barbieri, por su estímulo constante para que finalizara este proceso. Al Ing. Francisco Plaza, por la disposición a facilitar los datos ambientales y ayuda a la comprensión de estos.

A los integrantes de Escuela Ciencias del Mar, profesores, secretarias, auxiliares, y personal de biblioteca, por su disposición a enseñar, a formar profesionales y personas de gran calidad humana.

Finalmente, a mi grupo de amigos Constanza Low, Felipe Ángel y Rino Bravo por ser parte fundamental en este proceso universitario y en mi vida. Por estar siempre en esos momentos de estudio que sin duda jamás olvidaré. Y en esos momentos de distracción que siempre imaginábamos y que de alguna forma logramos realizar. Por crecer juntos y aceptarnos tal como somos.

## CONTENIDO

	Pág.
Comisión del proyecto de título	i
Informe sobre el proyecto	ii
Autorización de uso	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Contenido	vi
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
Resumen	xi
Abstract	xii
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. Antecedentes generales	4
3.1 Del recurso anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> )	4
3.1.1 Aspectos biológicos	4
3.1.2 Distribución batimétrica	5
3.1.3 Unidades de stock	5
3.1.4 Distribución y condiciones ambientales	5
3.2 De la pesquería	7
3.2.1 Descripción pesquería de anchoveta en el stock sur del Perú y norte de Chile	7
3.3 Antecedentes legales	9
3.3.1 Régimen de acceso	10
3.3.2 Vedas	10
3.4 Variables ambientales	11
3.4.1 Temperatura superficial del mar	11
3.5 Fluctuaciones interdecadales	13
3.6 Índice de surgencia	14
3.7 Reclutamiento	15
3.7.1 Principales hipótesis para explicar la variabilidad del reclutamiento	16
3.7.1.1 Teorías mecanicistas	17
3.7.1.2 Teorías de síntesis	19
3.8 Experiencias con ventanas ambientales óptimas	21
4. Materiales y métodos	23
4.1 Zona y período de estudio	23
4.2 Fuente y naturaleza de la información	23
4.3 Métodos estadísticos	26
4.3.1 Correlaciones entre reclutamiento y variables ambientales en diferentes periodos	27

4.3.2 Alternating conditional expectation ACE	27
4.3.3 Additivity and variance stabilization AVAS	28
4.3.4 Generalized additive models GAM	29
4.4 Aplicación de los métodos estadísticos	31
4.4.1 ACE y AVAS	31
4.4.2 GAM	33
5. Resultados	37
5.1 Análisis previos	37
5.1.1 Modelos lineales	37
5.1.2 Relación stock - recluta	37
5.1.3 Relación entre variables ambientales	41
5.1.4 Correlaciones entre R y variables ambientales en diferentes periodos	43
5.2 Modelos simples con ACE, AVAS y GAM	43
5.3 Modelos complejos con ACE, AVAS y GAM	44
5.3.1 Modelo 1	45
5.3.2 Modelo 2	49
5.3.3 Modelo 3	53
5.3.4 Modelo 4	57
5.3.5 Modelo 5	61
5.3.6 Ventana Ambiental Óptima	64
6. Discusiones	66
7. Conclusión	72
8. Referencias	73
Anexos	85

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Trabajos realizados sobre reclutamiento y su relación con variables ambientales explicatorias y métodos utilizados.	22
<b>Tabla 2.</b> Reclutamiento y Biomasa Desovante (semestral) de anchoveta del stock sur de Perú y norte de Chile estimado con el modelo estadístico de captura a la talla.	24
<b>Tabla 3.</b> Variables ambientales índice de surgencia, índice de turbulencia y temperatura superficial del mar, períodos semestrales del 1984- 2010	25
<b>Tabla 4.</b> Ajustes entre el reclutamiento y variables ambientales en diferentes periodos.	43
<b>Tabla 5.</b> Coeficiente de correlación $R^2$ y $p$ -values para modelos simples. ACE, AVAS, GAM.	44
<b>Tabla 6.</b> Coeficiente de correlación $R^2$ y $p$ -values para modelos complejos. ACE, AVAS, GAM.	44

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> ).	4
<b>Figura 2.</b> Esquema de las zonas de distribución de anchoveta en el SCH. Stock norte y centro de Perú (NCP) y sur de Perú y norte de Chile (SPNC).	6
<b>Figura 3.</b> Desembarques anuales de anchoveta en el sur de Perú y norte de Chile (1984–2009).	7
<b>Figura 4.</b> Promedio de los desembarques mensuales en el stock de anchoveta del sur del Perú y norte de Chile (Promedio 1994 – 2008, 2008 y 2009).	9
<b>Figura 5.</b> Índice de El Niño Oceánico, 1970–2008.	12
<b>Figura 6.</b> Resumen de la clasificación de las hipótesis que explican la variación en la abundancia de las clases anuales y el reclutamiento.	17
<b>Figura 7.</b> Teoría de la ventana ambiental óptima en el reclutamiento de clupeoides, en regiones de surgencia.	21
<b>Figura 8.</b> Función Summary en S-PLUS 2000.	32
<b>Figura 9.</b> Transformaciones óptimas, $R^2$ y número de iteraciones.	33
<b>Figura 10.</b> Ventana de comandos para iniciar GAM en S-PLUS 2000.	34
<b>Figura 11.</b> Ventana de comandos GAM.	35
<b>Figura 12.</b> Ventana de comandos para la creación de modelos S-PLUS 2000.	35
<b>Figura 13.</b> Informe entregado por S-PLUS 2000 para GAM.	36
<b>Figura 14.</b> Reclutamiento de anchoveta en función del IT, IS y TSM.	38
<b>Figura 15.</b> Relación entre la BD y el R.	39
<b>Figura 16.</b> Relación BD – R para el desove principal y secundario de anchoveta en el stock sur del Perú y norte de Chile, período 1984-2010.	40
<b>Figura 17.</b> Reclutamiento observado v/s ajuste modelos clásicos de Ricker y Beverton & Hold para la anchoveta del stock sur del Perú y norte de Chile.	40
<b>Figura 18.</b> Relaciones entre variables ambientales durante el período de desove de anchoveta entre 1984 y 2010.	42
<b>Figura 19.</b> Transformaciones óptimas ACE para BD, IS y R, modelo 1.	46

<b>Figura 20.</b> Transformaciones óptimas AVAS para BD, IS y R, modelo 1.	47
<b>Figura 21.</b> Transformación óptima GAM para IS, modelo 1.	48
<b>Figura 22.</b> Transformaciones óptimas ACE para BD, IT y R, modelo 2.	50
<b>Figura 23.</b> Transformaciones óptimas AVAS para BD, IT y R, modelo 2.	51
<b>Figura 24.</b> Transformación óptima GAM para IT, modelo 2.	52
<b>Figura 25.</b> Transformaciones óptimas ACE para BD, TSM y R, modelo 3.	54
<b>Figura 26.</b> Transformaciones óptimas AVAS para BD, TSM y R, modelo 3.	55
<b>Figura 27.</b> Transformación óptima GAM para BD y TSM, modelo 3.	56
<b>Figura 28.</b> Transformaciones óptimas ACE para BD, IS, TSM y R, modelo 4.	58
<b>Figura 29.</b> Transformaciones óptimas AVAS para BD, IS, TSM y R, modelo 4.	59
<b>Figura 30.</b> Transformación óptima GAM para IS y TSM, modelo 4.	60
<b>Figura 31.</b> Transformaciones óptimas ACE para la BD, IT, TSM y R, modelo 5.	62
<b>Figura 32.</b> Transformaciones óptimas AVAS para la BD, IT, TSM y R, modelo 5.	63
<b>Figura 33.</b> Transformación óptima GAM para TSM, modelo 5.	64
<b>Figura 34.</b> Test Kolmogorov-Smirnov para variable reclutamiento.	85
<b>Figura 35.</b> Cuantíales de normalidad para el modelo 1.	86
<b>Figura 36.</b> Homogeneidad de varianza para el modelo 1.	86
<b>Figura 37.</b> Diagnóstico de los residuos para el modelo 1.	87

## RESUMEN

En el presente estudio se analiza la relación entre el reclutamiento de la anchoveta (*Engraulis ringens*), la biomasa desovante (BD) y los índices de surgencia (IS), turbulencia (IT) y temperatura superficial del mar (TSM), en el stock sur del Perú y norte de Chile (16°-24°S). Hasta ahora, los estudios realizados que explican la relación entre este recurso y los factores ambientales emplean un modelo estadístico en base anual, lo cual no representa necesariamente la dinámica del recurso (especie de vida corta, extenso período reproductivo y período prolongado de reclutamiento a la pesquería). Por ello se desarrolló un nuevo enfoque basado en un modelo estadístico semestral, considerando un horizonte de análisis de 1984 a 2010 y dado el carácter no lineal de los datos se utilizaron modelos no paramétricos. Los índices de reclutamiento y la BD fueron proporcionados por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), obtenidos por medio de modelos estadísticos de captura a la talla. La TSM, IS e IT se utilizaron para caracterizar la variabilidad del medio ambiente. De éste análisis los modelos que incluyen la TSM resultaron difíciles de interpretar. El modelo resultante considera la BD e IS ( $R = BD + s(IS)$ ) con una curva de comportamiento en forma de cúpula o domo (ventana ambiental óptima) con un máximo en una velocidad del viento de 5,26 m/s y con una correlación significativa ( $R^2 = 63\%$ ;  $p < 0,023$ ) para el reclutamiento de anchoveta en el stock sur del Perú y norte de Chile.

**Palabras claves:** *Engraulis ringens*, reclutamiento, variables ambientales, stock sur del Perú y norte de Chile, modelos no paramétricos.

## ABSTRACT

In the present study, the relationship between recruitment of anchovy (*Engraulis ringens*), spawning biomass (SB) and upwelling index (UI), turbulence index (TI) and sea surface temperature (SST) was analyzed in the stock southern Peru and northern Chile (16°-24°S). So far, the relationship between this resource and environmental factors has been studied using statistical models on an annual basis, which does not necessarily represents the resource dynamic (i.e., short-lived species, long reproductive period and extended period of recruitment to the fishery). Therefore, a new approach based on a semi-annual statistical model is developed, using a data base from 1984 to 2010 and given the nonlinear nature of the data a nonparametric model was used. The recruitment index and SB were provided by the Fisheries Development Institute (IFOP), obtained through statistical models of catch at size. SST, IS and IT were used to characterize the variability of the environment. From this analysis, the models that including the SST have been difficult to interpret. The resulting model considers the SB and UI ( $R = SB + s(UI)$ ) with a performance curve in form of dome (optimal environmental window) with a maximum in a wind speed of 5,26 m/s and a significant correlation ( $R^2 = 63\%$ ;  $p < 0,023$ ) for anchovy recruitment in the stock southern Peru and northern Chile.

**Keywords:** *Engraulis ringens*, recruitment, environment variables, stock southern Peru and northern Chile, nonparametric model.

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los organismos marinos que habitan el Pacífico suroriental se encuentra la anchoveta (*Engraulis ringens*), principal recurso objetivo que junto a otros peces pelágicos como el jurel (*Trachurus murphyi*) y la sardina (*Sardinops sagax*), sostienen la pesquería de cerco de Perú y de Chile. La explotación de estas especies reviste gran importancia económica, generando miles de empleos directos e indirectos, con el consiguiente beneficio a la economía regional.

Desde mediados de la década de los 80, la anchoveta es el recurso de mayor importancia en el sur del Perú y norte de Chile, donde las capturas han presentado importantes fluctuaciones interanuales, variando entre un máximo histórico en 1994 y un mínimo en 1998. Desde el 2006, las capturas son menores al promedio, al igual que en el sur de Perú. Estos niveles fluctuantes de captura pueden ser explicados por la alta variabilidad oceanográfica, elevada productividad de los procesos de surgencias costeras y por el transporte de elementos nutritivos desde la región subantártica, por la corriente de Humboldt, que ocurren frente a la costa de Chile y Perú (Bernal *et al.*, 1983; Barber & Chávez, 1983; Chávez *et al.*, 2008; Fuenzalida *et al.*, 2009).

La anchoveta vive en cardúmenes densos, está sometida a frecuentes e intensos eventos de surgencia, posee rasgos de historia de vida que se caracterizan por patrones de baja longevidad, tiempo generacional corto y alta mortalidad. Debido a estas características, ésta especie se ve afectada por fluctuaciones ambientales como los fenómenos El Niño, La Niña y variaciones interdecadales (Martínez *et al.*, 1995; Yáñez *et al.*, 1995; Yáñez *et al.*, 2001), lo que se traduce en grandes variaciones de la abundancia, determinando así los niveles de agregación, éxito del desove, reclutamiento y rendimiento pesquero de la anchoveta (Lluch-Belda *et al.*, 1989, 1992; Kawasaki, 1991). En este sentido, es importante señalar que la distribución, abundancia y estadíos de desarrollo (huevos y larvas) del recurso, se ven afectadas seriamente durante estos fenómenos, debido a la aparición de masas de agua más cálidas y salinas de origen subtropical (Jacob, 2002). A lo anterior se suma el hecho de que masas de agua con alto contenido de nutrientes se profundizan, quedando fuera de la zona trófica, lo que implica que las especies se ubiquen en aguas de menor temperatura y salinidad, situación que disminuye su vulnerabilidad al cerco (Braun *et al.*, 1999). Por lo tanto, la característica principal de esta pesquería es su alta dependencia a los pulsos de reclutamiento, los cuales han presentado importantes fluctuaciones en los últimos años (Castillo *et al.*, 2000; Braun *et al.*, 2008).

El reclutamiento es el número de individuos jóvenes de una población que contribuyen cada año a la renovación del stock explotable. El comportamiento de esta variable ha sido analizado con la teoría stock-recluta, donde el reclutamiento es explicado por la biomasa parental, observando gran variabilidad en la relación entre éstas. Esto se

debe a que los modelos stock-recluta provienen de una formulación teórica y determinar su forma precisa es difícil en la práctica (Myers & Barrowman, 1996). Los modelos clásicos, como el de Ricker ó Beverton & Holt, contienen implícito el supuesto de proporcionalidad entre el stock desovante y la producción de huevos, aunque hay evidencias que sostienen que dicho supuesto no siempre es válido. Además, el ambiente tiene un rol importante en la determinación de la fortaleza de la clase anual, debido a que afecta a la sobrevivencia de los primeros estadíos de vida a través de varios procesos físicos-biológicos acoplados (Marshall *et al.*, 1998).

Dado lo anterior, analizar y comprender la variabilidad del reclutamiento constituye un desafío. Al respecto existen varias hipótesis que se pueden agrupar en dos tipos: i) la teoría mecanicista, que considera como causas específicas de mortalidad de estadíos tempranos a factores tales como el transporte, la estabilidad de la columna de agua, la inanición y la predación (Hjort, 1914; Lasker, 1978; Parrish *et al.*, 1983; Iles & Sinclair, 1982; Rothschild & Osborn, 1988), y ii) la teoría de síntesis, a través de la cual se intenta unificar o integrar las hipótesis mecanicistas bajo un esquema conceptual único, entre la cual se encuentra la teoría de la ventana ambiental óptima (Cury & Roy, 1989).

La teoría de la ventana ambiental óptima planteada por Cury & Roy (1989) establece que existen relaciones en forma de cúpula entre el reclutamiento y los índices de surgencia y turbulencia en zonas donde se presenta surgencia tipo Ekman, determinando que el reclutamiento es maximizado cuando los factores limitantes (surgencia-turbulencia) son intermedios; éste lugar de la curva es denominado ventana ambiental óptima. Por otro lado, Cole (1999) considera que la temperatura superficial del mar es un buen indicador de los cambios del ecosistema, afectando el reclutamiento con una marcada influencia sobre la mortalidad, el crecimiento, el desarrollo y la producción de alimento para larvas y pre-reclutas. En base a esto, es necesario explicar el reclutamiento tomando en cuenta no sólo la población desovante, sino también la variabilidad ambiental (Csirke, 1980; Cury & Roy, 1989). Por lo tanto, se probará si la teoría de la ventana ambiental óptima es aplicable a la unidad del stock del sur del Perú y norte de Chile para la especie anchoveta, con el fin de analizar y establecer posibles relaciones que pudiesen explicar la variabilidad del reclutamiento.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

- Determinar relaciones entre fluctuaciones ambientales y la variabilidad del reclutamiento del recurso anchoveta (*Engraulis ringens*) del stock sur del Perú y norte de Chile.

### 2.2 Objetivos específicos

- Modelar la variabilidad del reclutamiento y su relación con la biomasa desovante y variables ambientales.
- Determinar la existencia de una ventana ambiental óptima en la relación entre el reclutamiento con la biomasa desovante y el ambiente.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES

#### 3.1 Del recurso anchoveta (*Engraulis ringens*)

##### 3.1.1 Aspectos biológicos

En términos generales, la anchoveta (Fig. 1) presenta un cuerpo alargado poco comprimido, cabeza larga, labio superior prolongado en un hocico y ojos muy grandes. Su color varía de azul oscuro a verdoso en la parte dorsal y es plateada en el vientre. Se caracteriza por poseer una vida corta, hábitos pelágicos, longevidad máxima de alrededor de 5 años, longitud máxima de 19 cm, alcanza la primera madurez sexual en el primer año de vida. Presenta desoves durante todo el año, aunque el período principal es en invierno con un máximo en agosto-septiembre y el secundario a fines de primavera y comienzos del verano con un máximo en noviembre-diciembre. Desde marzo hasta mayo la actividad reproductiva disminuye de una manera considerable, época considerada de reposo sexual (Braun *et al.*, 1995). Existen marcados cambios en la extensión y localización de los focos de desove de un año a otro, siendo el río Loa y sus inmediaciones un área caracterizada por su estabilidad y permanencia. Las diferencias interanuales de las áreas de desove dependen de los eventos climáticos-oceanográficos y/o la explotación del recurso (Oliva *et al.*, 2000).



**Figura 1.** Anchoveta (*Engraulis ringens*)

Fuente: SUBPESCA, 2008.

El reclutamiento a la pesquería es estimada entre los 5 y 6 meses (Serra, 1986) con longitud total entre 6 y 12 cm, en estaciones cálidas de noviembre a marzo (Fisher, 1958; Einarson & Rojas de Mendiola, 1963; Martínez *et al.*, 2007). Nuevos estudios plantean que la especie fue capaz de alcanzar los 12 cm longitud total en aproximadamente 4 meses de vida (Araya *et al.*, 2008; Cerna *et al.*, 2011). La pesquería se compone comúnmente de cuatro clases anuales y la fracción más capturada corresponde a ejemplares de entre 6 meses y 2 años de edad (Castillo *et al.*, 2001).

El desove y especialmente el reclutamiento son muy sensibles a los cambios en las condiciones ambientales (temperatura, salinidad, etc.), cuyos efectos se ven reflejados inmediatamente en el stock, dada la corta vida de la especie. Esta condición genera una alta variabilidad en el tiempo, que dificulta las proyecciones de biomasa (SUBPESCA, 2008).

Esta especie es eminentemente planctófaga. La larva de primera alimentación es fitoplanctófaga y altamente selectiva en el tamaño del alimento; las larvas de más de una semana depredan sobre el microzooplancton, los juveniles y adultos sobre zooplancton adulto, preferentemente. Juveniles y adultos jóvenes pueden eventualmente alimentarse de fitoplancton en altas concentraciones locales (SUBPESCA, 2008).

### **3.1.2 Distribución batimétrica**

La anchoveta presenta un marcado comportamiento migratorio nictimeral, ubicándose durante las horas de luz diurna asociado a la capa de mezcla (50 m), migrando hacia la superficie en la noche siguiendo el patrón de migración nictimeral del plancton. Este comportamiento se modifica notablemente por influencia de la luz lunar, en que los peces adoptan una distribución vertical induciendo un incremento en la profundidad de las agregaciones (Castillo *et al.*, 2001).

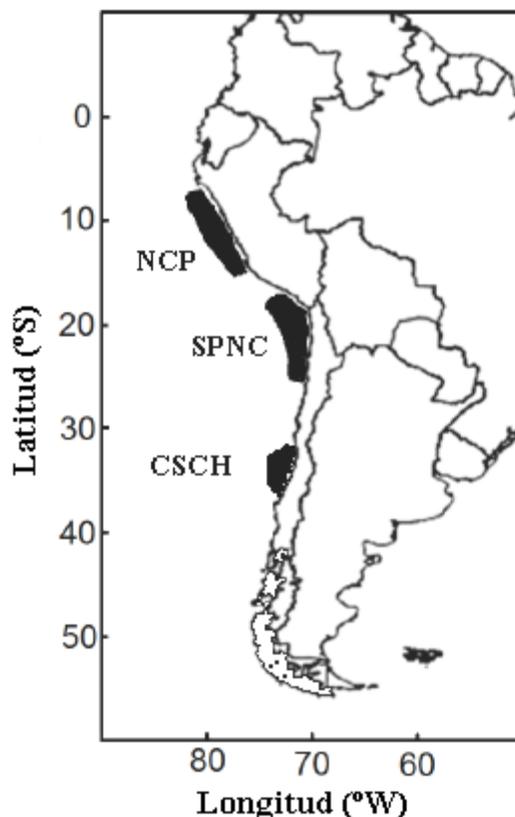
### **3.1.3 Unidades de stock**

En el Sistema de Corrientes de Humboldt (SCH), la anchoveta tendría tres stocks discretos (Fig. 2). El más productivo de éstos se encuentra en el centro-norte de Perú (4°-15°S), otro es compartido entre el sur de Perú y la zona norte de Chile (16°-24°S), y el más austral y menos abundante se localiza en Chile centro-sur (34°-40°S). Durante las últimas décadas, en estas unidades han ocurrido fluctuaciones importantes en su tamaño poblacional (Yáñez *et al.*, 2001; Chávez *et al.*, 2003), reconociéndose que el principal problema para un manejo efectivo está en el carácter variable de la abundancia (Csirke, 1980).

### **3.1.4 Distribución y condiciones ambientales**

Yáñez *et al.* (1995) y resultados de prospecciones acústicas realizadas en la zona norte de Chile (Castillo *et al.*, 1993; Braun *et al.*, 1995), han permitido establecer que la anchoveta preferentemente se distribuye en las cercanías de la costa, llegando ocasionalmente en los inviernos hasta las 60 mn. En los períodos estivales la anchoveta incrementa su presencia y densidad en áreas costeras, no superando las 30 mn, situación que se debe a la influencia de los intensos gradientes térmicos y salinos, que se producen en zonas cercanas a la costa y limitan por el oeste la distribución de esta especie (Castillo *et al.*, 1996). Los juveniles pueden alcanzar hasta un máximo de 20 mn de la costa, en sectores con una plataforma continental extensa (Córdova *et al.*, 1995), concentrándose principalmente en una franja costera que llega hasta las 3 mn de la costa, presentando un patrón migratorio de alta frecuencia en el sentido este-oeste entre el día y la noche,

registrándose un movimiento de frecuencia diaria hacia el oeste en el crepúsculo, regresando a la costa al amanecer.



**Figura 2.** Esquema de las zonas de distribución de anchoveta (*Engraulis ringens*) en el SCH. Stock norte - centro de Perú (NCP) y sur de Perú y norte de Chile (SPNC).

En efecto, los valores más importantes de captura por unidad de esfuerzo (CPUE), se ubican dentro de las primeras 20 mn de la costa y están estrechamente asociadas a los focos permanentes de surgencia además, de fuertes gradientes térmicos y salinos. En este sentido, Strub *et al.* (1991) encuentra una fuerte correlación espacial entre los diferenciales térmicos y la presencia de altas concentraciones de fitoplancton, las cuales explican los volúmenes de capturas. Este comportamiento se presenta al sur de Arica, al norte y sur de Iquique, al sur del río Loa y alrededor de Mejillones, donde se registran las mayores concentraciones de clorofila “a” (Osses, 1990; Barbieri *et al.*, 1995).

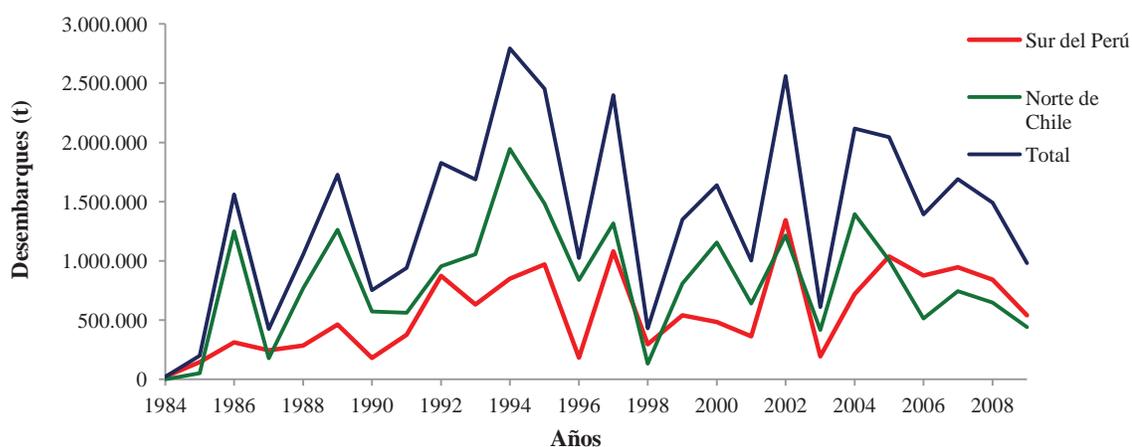
La anchoveta se localiza preferentemente entre los 16 y 18 °C de temperatura en invierno y primavera, ampliando el límite superior hasta los 19 °C en otoño, mientras que en verano se sitúa entre los 19 y 22 °C, siendo los sectores de mayor gradiente térmico y salino los que definen la distribución espacial de la especie en sentido horizontal y vertical—

termoclina (Castillo *et al.*, 1996; Castillo *et al.*, 2000; Swartzman *et al.*, 1994). Respecto a los huevos de anchoveta se distribuyen entre el rango 13-16,9°C, con una preferencia por el rango 15-16,9°C (Braun *et al.*, 2008). Los juveniles de anchoveta se ubican preferentemente entre la costa y el borde interno de los frentes costeros, asociados a altos rangos de clorofila a (Castillo *et al.*, 1997 y 1998). Con respecto a la salinidad, esta especie posee un estrato óptimo entre 34,4-34,79 psu (Castillo *et al.*, 2011).

## 3.2 De la pesquería

### 3.2.1 Descripción de la pesquería de anchoveta en el stock sur del Perú y norte de Chile

El desembarque total para ambos países durante el periodo 1980 – 2009 muestra en general mejores rendimientos en 1992, 1997, 2002 y 2004 (Fig. 3). En el periodo 1999-2004 el desembarque supera el millón de toneladas anuales, con un record histórico de 2,56 millones de toneladas en 2002. En la región sur del Perú, desde 2003 a 2008, la tendencia de los desembarques fue creciente en el primer trimestre del año, asociado al incremento del esfuerzo pesquero producto de las vedas impuestas en la región norte-centro (Bouchon, *et al.*, 2008). Durante 2009, el patrón estacional cambia, observando las mayores capturas en los últimos meses del año. En la zona norte de Chile los mayores desembarques se presentan en el segundo trimestre del año. Cabe mencionar que a partir del 2006, los desembarques de anchoveta fueron menores en el norte de Chile con respecto a la pesquería del sur del Perú, siendo el patrón general lo opuesto. La explicación a este hecho es el mayor esfuerzo en la pesquería del sur del Perú y eventualmente una mayor disponibilidad de anchoveta en esta región.



**Figura 3.** Desembarques anuales de anchoveta en el sur de Perú y norte de Chile (1984–2009).

Los desembarques muestran grandes variaciones en los niveles de captura (Fig. 3), producto de cambios en el régimen de abundancia de la especie, ocasionados por las variaciones ambientales de largo plazo registradas en la zona (SUBPESCA, 2008).

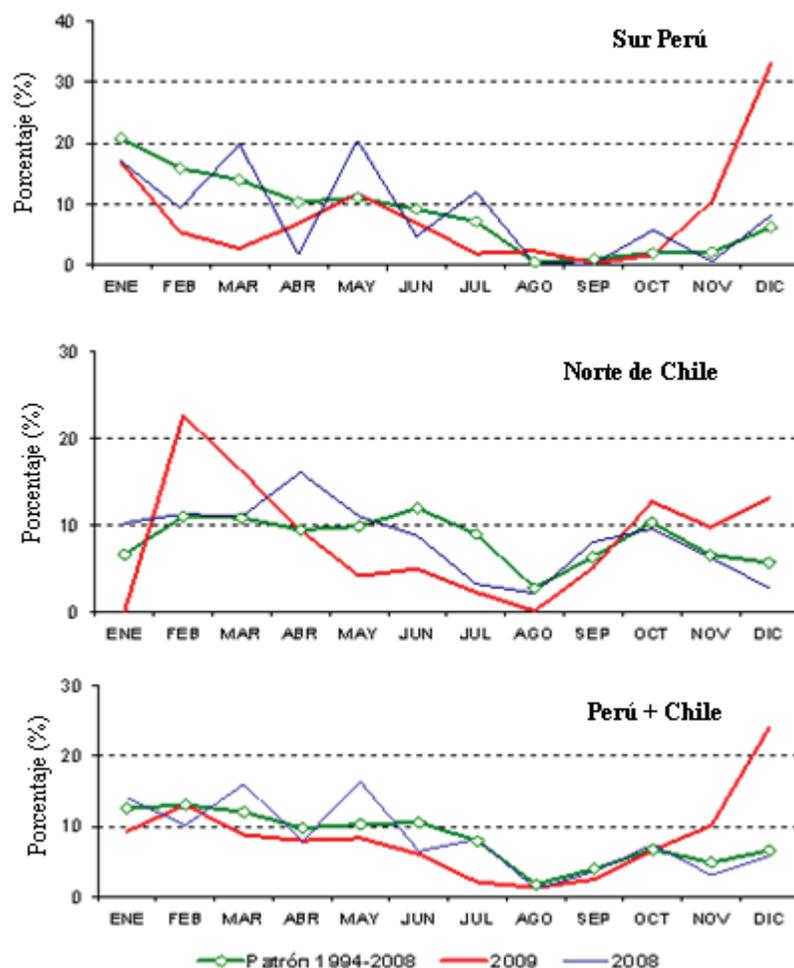
Específicamente en Chile, los desembarques en el período 50 al 64, corresponden al inicio de la pesquería con un crecimiento sostenido. A partir de este último año los desembarques decrecen. Según Martínez (1991), esto se debe a cambios ambientales asociados al fenómeno El Niño (1965) y también a los altos niveles de esfuerzo de pesca registrados ese año. Asimismo, explica que en 1971 y 1973, se produce una gran disminución en el volumen de desembarque de la anchoveta producto del fenómeno El Niño (1972-1973), marcando el inicio de un régimen de baja abundancia (Yáñez *et al.*, 2001). En 1977 según la tendencia, se produce una abrupta baja en el desembarque asociado al fenómeno El Niño (1976) al igual que en 1983.

El segundo período de alta abundancia que abarca desde 1986, muestra un aumento del volumen desembarcado, para luego decaer producto de un cambio ambiental asociado a El Niño (1987). Posteriormente, en 1988-1989 las capturas aumentan, probablemente por la declinación del efecto ambiental.

En 1994 ocurre un desembarque histórico con 1,9 millones de toneladas (SERNAPESCA, 1994), observando luego una disminución de los desembarques, mostrando una importante caída en 1998, asociado a la presencia del evento El Niño (1997-1998), llegando a un valor de 1,4 millones de toneladas en 1997 y drásticamente en 1998 con 144.900 toneladas.

En 1999, los desembarques sufren una considerable recuperación alcanzando las 800.000 toneladas. Posterior a esta fecha, se observa una alta variación interanual en el desembarque, con máximos de 1,2 y 1,4 millones de toneladas en 2002 y 2004 respectivamente, y mínimos de 440 mil y 520 mil toneladas el 2003 y 2006, respectivamente.

El patrón estacional de captura de la anchoveta para la zona sur del Perú y norte de Chile, indica que los mayores desembarques se producen en el primer semestre. Particularmente, en el sur del Perú las capturas se producen principalmente en el verano (noviembre y diciembre), asociadas a un incremento del esfuerzo pesquero, debido a los desplazamientos de la flota de la región norte-centro del Perú en épocas de veda. Por otro lado, en la zona norte de Chile para el 2009, las mayores capturas se registraran en los periodos febrero - marzo y octubre - diciembre (Fig. 4).



**Figura 4.** Promedio de los desembarques mensuales en el stock de anchoveta del sur del Perú y norte de Chile (Promedio 1994 – 2008, 2008 y 2009).

### 3.3 Antecedentes legales

El stock sur del Perú y norte de Chile es compartido por ambos países; sin embargo, su manejo no se realiza de forma conjunta y/o coordinada.

En Chile, la administración de esta pesquería está a cargo de la Subsecretaría de Pesca (SUBPESCA). La fiscalización y control del cumplimiento de las normas está a cargo del Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA), ambas dependientes del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (MINECOM).

En Perú, la administración y control de la pesca es ejercido por el Ministerio de la Producción (PRODUCE), a través del Vice ministerio de Pesquería, los cuales son informados y asesorados por el Instituto del Mar del Perú, IMARPE. Todas las decisiones de gestión pública tales como las Resoluciones Ministeriales (R.M.) son autorizadas y firmadas por el Ministro de la Producción.

### **3.3.1 Régimen de acceso**

En Perú, la pesquería de anchoveta al sur del paralelo 16° S fue de acceso libre hasta junio de 2009, fecha en la cual se implementa en la zona sur, el régimen Límites Máximos de Captura por Embarcación (D.S. N° 009-2009-PRODUCE) y en consecuencia, se inició la asignación de cuotas globales de captura para esta pesquería (D.S. N° 021-2008-PRODUCE). La Ley establece dos temporadas de pesca por año, una durante el primer semestre del año y otra durante el segundo semestre. La duración de las temporadas de pesca depende de las condiciones ambientales y biológicas observadas por el IMARPE.

En Chile, la pesquería de anchoveta de las Regiones XV, I y II se encuentra bajo régimen de Plena Explotación (D.S. N° 354 de 1993) y en consonancia el otorgamiento de nuevos permisos para la pesca artesanal o industrial está suspendido (R. EX. N°3122- 2008 SUBPESCA). Desde el 2001, el esquema de asignación de cuota para el sector industrial se rige por el Límite Máximo de Captura por Armador y para el sector artesanal existe el fraccionamiento de la cuota por región.

### **3.3.2 Vedas**

En Chile, anualmente se establecen vedas de carácter biológico, con el objetivo de proteger el proceso reproductivo y de reclutamiento de la anchoveta. En la unidad de pesquería XV, I y II, el período de veda tiene carácter móvil y se establece de conformidad a los indicadores biológico-pesqueros monitoreados en la zona. Las vedas de anchoveta históricas para los últimos años indican que entre enero - febrero se decreta una veda de reclutamiento y en el periodo agosto - septiembre una veda reproductiva. Por último, mediante resoluciones de SUBPESCA, se permite el acceso excepcional a embarcaciones industriales para que pesquen anchoveta dentro de las primeras 5 millas náuticas, que normalmente se reservan para la pesca artesanal (R. EX. N°3122- 2008 SUBPESCA).

En Perú, no se indica la existencia de vedas entre temporadas; aún así, se realizan cierres biológicos en determinadas áreas, relacionados con la presencia de juveniles.

### 3.4 Variables ambientales

#### 3.4.1 Temperatura superficial del mar (TSM)

La TSM se considera un buen indicador de los cambios del ecosistema y puede afectar directamente al reclutamiento, teniendo un efecto marcado sobre la mortalidad de los peces, afectando el crecimiento, el desarrollo de huevos, larvas y la producción de alimento para larvas y pre-reclutas (Stocker & Haist, 1985). Por lo tanto, las condiciones ambientales pueden generar variaciones, ya sea alterando los niveles de los organismos alimenticios o produciendo algún tipo de daño en los huevos y larvas (Houde, 1987). El efecto de la variabilidad de temperatura afecta las tasas de maduración gonadal y atresia ovocitaria en esta especie, ya que es conocido que tales cambios modifican la calidad y cantidad de los desoves y por consiguiente el reclutamiento en peces (Lluch-Belda *et al.*, 1991; Funamoto & Auki, 2002; Takasuka *et al.*, 2005). Al respecto, sólo algunos trabajos reportan los cambios en la fecundidad y la biomasa desovante con respecto a variables ambientales (Lambert & Dutil, 2000; Buitrón & Perea, 2000).

En condiciones normales, las aguas del océano Pacífico en América del Sur, desde Chile hasta el sur de Ecuador, son frías y ricas en nutrientes generando un ecosistema con abundante vida marina que explica la riqueza pesquera de países como Perú y Chile, debido a la acción combinada de las surgencias costeras y del transporte de elementos nutritivos desde la región subantártica por la corriente de Humboldt (Bernal *et al.*, 1983).

En eventos “El Niño”, los vientos alisios se debilitan y atenúan la corriente fría de Humboldt, lo que hace que desde el otro lado del Pacífico, desde Indonesia y Australia, aguas cálidas del océano lleguen a la costa suramericana entre Chile y el sur de Ecuador y desplazan las aguas frías de la corriente de Humboldt. Al comienzo de ésta fase, se produce un aumento significativo de la TSM en el este del Pacífico ecuatorial y junto a la costa sudamericana. Este calentamiento está asociado a la propagación de una onda Kelvin oceánica que se desplaza de oeste a este por la base de la termoclina, y que se genera por bruscas fluctuaciones de los vientos alisios en el sector occidental del Pacífico. El desplazamiento de la onda Kelvin hacia el este, es lo que induce la profundización de la termoclina en dicho sector, lo que permite el desarrollo de una capa cálida de mayor grosor. La presencia de esta capa cálida impide el ascenso de agua más profunda, fría y rica en nutrientes hacia la superficie (disminuye la surgencia), y es lo que produce una notable anomalía positiva de la temperatura superficial del mar en las regiones este y central del océano Pacífico, especialmente en las costas de Colombia, Ecuador, Perú y norte de Chile.

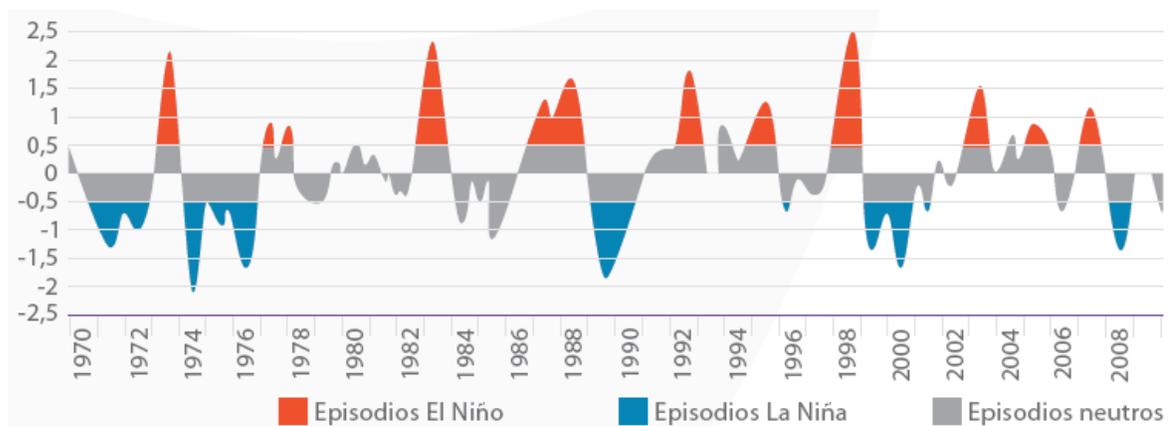
Una onda Kelvin se propagará hasta chocar con la costa del continente americano, transportando energía hacia el este y produciendo profundización de la termoclina, aumento del nivel del mar e incrementos en los valores de TSM entre otros factores. Una vez en la

costa, la onda Kelvin se dividirá en una Rossby que se reflejará hacia el oeste y en dos nuevas ondas Kelvin que viajarán atrapadas a la costa en dirección hacia los polos (Maturana *et al.*, 2004).

Se denomina “El Niño” a la presencia de aguas anormalmente cálidas y salinas, las cuales presentan esta característica por un período mayor a tres meses consecutivos. Este comportamiento se desplaza desde el norte hacia el sur, en forma paralela a la costa sudamericana y produce una gran alteración en los recursos hidrobiológicos, afectando positiva o negativamente a la producción pesquera (Gutiérrez, 2001). Se presenta con variada intensidad, siendo los episodios de 1982-1983 y 1997-1998 los de más impacto en el siglo XX.

En otras ocasiones ocurre el fenómeno opuesto, los vientos alisios del sur se intensifican frente a las costas suramericanas y provocan un mayor afloramiento de aguas frías, las cuales cubren la superficie del Pacífico desde Suramérica hasta un poco más allá del centro del océano. Por sus características contrarias a El Niño, este fenómeno es conocido como “La Niña”. Se destacan los episodios de 1988-1989 y 1998-2000 por su intensidad, duración y efecto climático (Fig. 5).

La anchoveta es una especie de aguas relativamente frías. Por tanto, un aumento en la temperatura, provoca que masas de agua con alto contenido de nutrientes se profundicen, quedando fuera de la zona trófica de este recurso, interrumpiendo los procesos de producción autotrófica y heterotrófica, lo que implica que las especies se ubiquen en aguas de menor temperatura y salinidad. Por lo tanto, dada la distribución batimétrica, la cual alcanza profundidades de 100 m aproximadamente (Espino, 1999), la especie presenta una disminución de la vulnerabilidad al cerco y la consecuente disminución de las capturas (Braun *et al.*, 1999).



**Figura 5.** Índice de El Niño Oceánico, 1970–2008. (Fuente: Elaborado a partir de NOAA, 2009).

El Niño trae consecuencias en el proceso de reproducción de la biomasa, ya que este efecto es una alteración a las condiciones normales de reproducción, por lo tanto se cambian los patrones de desove, tanto en el tiempo como en el espacio, provocando cambios en la distribución de las larvas, lo cual afecta el reclutamiento y por ende la abundancia (Jacob, 2002; Yáñez *et al.*, 2003).

La TSM está asociada con importantes migraciones de peces pelágicos; así, durante eventos cálidos (El Niño) la anchoveta se distribuye preferentemente cerca de la costa, en cambio durante periodos fríos (La Niña), posee una mayor extensión fuera de la costa (Yáñez *et al.*, 1995).

### 3.5 Fluctuaciones interdecadales

Las fluctuaciones interdecadales, son cambios ambientales de baja frecuencia y de mayor duración que los fenómenos El Niño y La Niña. Éstos pueden durar una década o más, y tienen efectos sobre poblaciones pelágicas como la anchoveta (Yáñez *et al.*, 2003). Estos cambios de régimen son causados por períodos de temperaturas cálidas o frías, anomalías relacionadas con la intromisión o la retirada de las aguas subtropicales cálidas en las costas de Perú y Chile (Swartzman *et al.*, 2009).

La anchoveta predomina sobre otros recursos durante períodos interdecadales fríos (anomalías negativas de la temperatura). Según Yáñez *et al.* (2001); Alheit & Ñiquen (2004), para el sistema de la corriente de Humboldt, se identificaron tres períodos: dos favorables para el reclutamiento de anchoveta 1950-1970 y 1985-2004, y uno desfavorable 1970-1985. Chávez *et al.* (2003) sugirieron un cambio de ambiente frío “régimen de anchoveta” a mediados de la década de 1970, y otro desde 1990. Yáñez *et al.* (2003, 2008) también analizan los cambios de régimen para anchoveta en Chile, postulando un cambio favorable para la sardina a inicios de la década de los 70 y otro cambio a fines de los 80 que favoreció a la anchoveta.

Actualmente existe bastante evidencia que sugiere que los ecosistemas marinos son impulsados por fluctuaciones decadales e interdecadales asociadas con forzantes climáticos (Stenseth *et al.*, 2004), como se sugiere para los sistemas de borde oriental (Yáñez *et al.*, 2001; Alheit & Hagen, 2001; Chávez *et al.*, 2003; Yáñez *et al.*, 2008).

La escala estacional es importante en términos de los principales procesos poblacionales como la reproducción. En la escala interanual en cambio, destacan los cambios de abundancia y del reclutamiento, mientras que en la escala decadal las

poblaciones responden a cambios que perduran por varios años en el ecosistema entero (Yáñez *et al.*, 2003).

Cahuín (2010), indica que regímenes climáticos afectan significativamente la tasa de producción de reclutas de anchoveta, con efectos significativos en los factores denso-dependientes de la biomasa frente a las costas de Perú y norte de Chile. Un régimen favorable determina un menor efecto en los procesos denso-dependientes, incrementando el éxito del reclutamiento; mientras que un período desfavorable determina un incremento del efecto en los procesos denso-dependientes afectando la productividad de la anchoveta.

Yáñez *et al.* (2003) muestran que durante el periodo 1977 se produjo un cambio en el ambiente o más bien un calentamiento en la temperatura superficial del mar (TSM) que permaneció hasta fines de la década de los 80. Como consecuencia de esta alza en la temperatura, los desembarques de este periodo son bajos coincidiendo con el comportamiento de la anchoveta asociado a temperaturas más bien frías. A partir de 1986, se presenta un aumento en los desembarques, dado que en este año comienza una tendencia al enfriamiento en la TSM. Por lo tanto, como menciona el autor, los cambios interdecadales influyen de forma significativa en los pulsos de abundancia, afectando a las poblaciones de peces pelágicos de forma inmediata a través de cambios espaciales en la distribución de la abundancia y cambios temporales de corto a mediano plazo a través de la magnitud del reclutamiento.

En consecuencia, los cambios de régimen climático pueden reorganizar las comunidades marinas y las relaciones tróficas, con los consiguientes cambios en el dominio y la mezcla de las especies en escalas de tiempo decadales (Steele, 2004; Collie *et al.*, 2004).

### 3.6 Índice de surgencia

En Chile, los principales factores causantes del proceso de surgencia son: los vientos (intensidad, duración y dirección), la geometría de la línea de costa, la batimetría y la estratificación del océano producto de la disposición de las masas de agua de diferentes características físicas y químicas (Vergara, 1992). La acción combinada de estos factores dan origen al evento de surgencia, el cual se entenderá como la divergencia horizontal de la capa superficial de agua, producida por viento paralelo a la costa en dirección al Ecuador, y por el efecto de la rotación terrestre que produce un transporte de agua hacia el océano interior, conocido como transporte de Ekman (Montecinos, 1991). Como consecuencia de este transporte de agua hacia el océano, se genera un vacío en las capas superficiales del mar, lo que permite el ascenso desde el fondo, de aguas subsuperficiales de menor

temperatura y ricas en nutrientes, promoviendo de esta forma el incremento de la producción primaria.

La ocurrencia de estos intensos procesos de surgencia costera, altera la estructura oceanográfica de una zona dada, produciendo variaciones en los parámetros físicos y químicos que afectan directamente la abundancia del fitoplancton causando una alta productividad secundaria, lo que se traduce en altas capturas pesqueras (Bilio, 1985; Odum, 1991).

Por otro lado, Braun *et al.* (2005) explica que una surgencia débil restringe la entrada de nutrientes con la consecuente disminución de la producción biológica y reduce la retención larval debido a que no se generan las estructuras de recirculación sobre la plataforma. En el caso contrario, una surgencia extremadamente fuerte produce mucha turbulencia y el transporte hacia fuera de la costa se incrementa produciendo una dispersión de las larvas fuera del dominio costero.

La anchoveta se caracteriza por utilizar los centros de surgencia y áreas adyacentes como hábitat preferido, ocupándolos tanto durante la época de desove y como centros de alimentación para juveniles y adultos (Bernal, 1990). En la zona norte de Chile las surgencias costeras prevalecen durante todo el año, debido a la predominancia de vientos del sur y suroeste; éstos presentan características similares en Arica, Iquique y Antofagasta, con valores máximos durante el período cálido (entre noviembre y marzo) y mínimos en invierno (Pizarro *et al.*, 1994); en tanto que en la costa peruana son máximas en invierno, por los vientos predominantes y la dirección de la costa.

### 3.7 Reclutamiento

El reclutamiento es definido, desde un punto de vista pesquero, como el proceso por el cual los individuos juveniles sobrevivientes de los estadios tempranos de huevos, larva y postlarva, pasan por primera vez a ser vulnerables por la pesquería (Bakun, 1989). El reclutamiento es altamente variable y constituye una de las causas principales de las fluctuaciones de la abundancia de los recursos pesqueros (Csirke, 1980). La magnitud del reclutamiento es función tanto de la estrategia reproductiva como del tamaño del stock desovante (si no hay padres no hay descendencia), y por factores exógenos a la población asociados a cambios en las condiciones ambientales que se presentan durante el desove y la fase pre-recluta.

Es usual observar una gran variabilidad en cualquier relación stock-recluta, lo que impide identificar muchas veces el modelo stock-recluta subyacente. Esto se debe a que

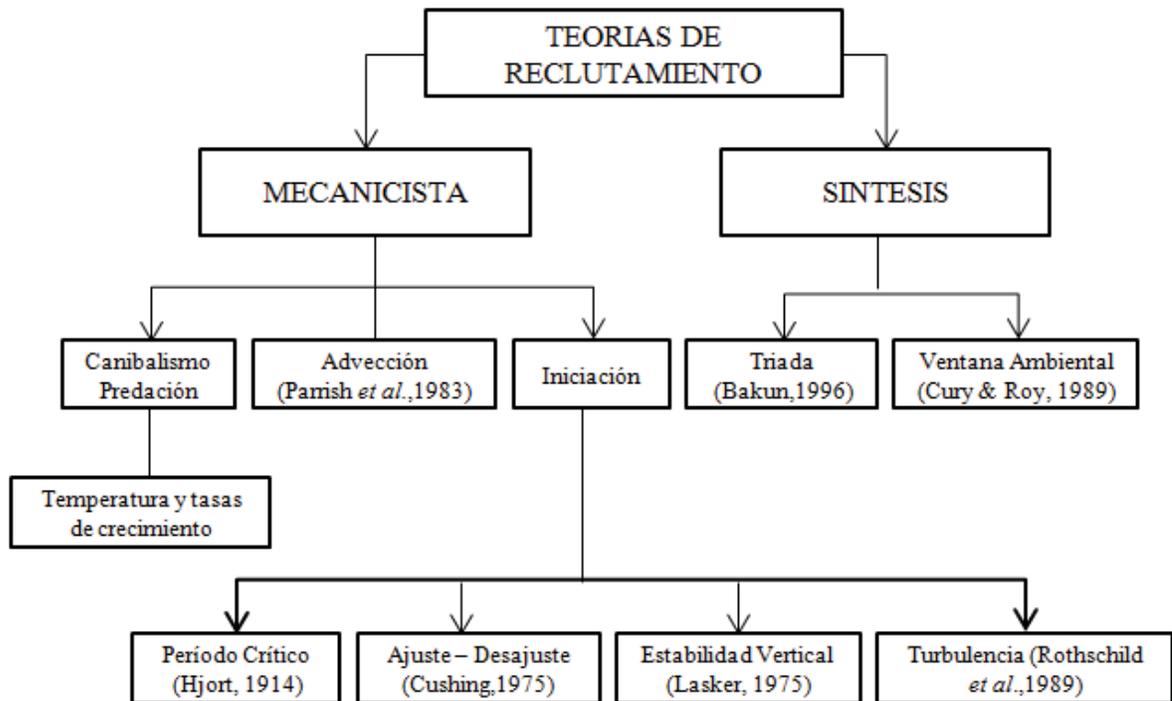
aunque los modelos stock-recluta provienen de una formulación teórica, determinar su forma precisa es muy difícil en la práctica (Myers & Barrowman, 1996), principalmente porque los datos son altamente dispersos, o el número de datos disponibles es insuficiente, o los modelos stock-recluta clásicos, tales como el de Ricker o el de Beverton & Holt, contienen implícito el supuesto de proporcionalidad entre el stock desovante y la producción de huevos, aunque hay evidencias que sostienen que dicho supuesto no siempre es válido (Marshall *et al.*, 1998); o porque el ambiente tiene un rol importante en la determinación de la fortaleza de la clase anual, debido a que afecta a la sobrevivencia de los primeros estadios de vida a través de varios procesos físico-biológicos acoplados o por cambios espaciales.

Los desafíos científicos más importantes en relación con el manejo de las pesquerías pelágicas radican en distinguir, lo más claramente posible, los efectos de la pesca de aquellos provocados exclusivamente por cambios ambientales, y en cómo incorporar la variabilidad ambiental en los modelos de evaluación y manejo considerando cierta capacidad de predicción del ambiente. El principal problema para un manejo efectivo de las pesquerías pelágicas radica en el carácter variable de la abundancia en varias escalas temporales y espaciales. Los cuerpos teóricos que tratan de explicar la variabilidad de la abundancia básicamente se fundamentan en los procesos que determinan la sobrevivencia de los primeros estadios de vida y el posterior reclutamiento (Cole & McGlade, 1998), como también en el impacto de los ciclos de producción y la complejidad de las interacciones tróficas existentes entre los diferentes componentes que utilizan la productividad de las poblaciones de peces pelágicos pequeños en los ecosistemas marinos (Cury *et al.*, 2000).

### 3.7.1 Principales hipótesis para explicar la variabilidad del reclutamiento

Cole & McGlade (1998), separan en dos grandes categorías las hipótesis que dan cuenta de cómo el éxito en el reclutamiento es influenciado por la sobrevivencia de los estadios tempranos (Fig. 6):

- a) **Teorías mecanicistas**, que tienen relación con procesos específicos que dan cuenta de la mortalidad de huevos y larvas;
- b) **Teorías de síntesis**, que apuntan a unificar varias teorías mecanicistas en un solo gran cuerpo teórico.



**Figura 6.** Resumen de la clasificación de las hipótesis que explican la variación en la abundancia de las clases anuales y el reclutamiento (Fuente: Cole & McGlade, 1998).

### 3.7.1.1 Teorías mecanicistas

#### a) Inanición

- *Período crítico:* La hipótesis de inanición está basada en la premisa que si una larva no encuentra suficiente cantidad de alimento luego de la absorción del saco vitelino, inevitablemente morirá (Blaxter & Hunter, 1982). Esta hipótesis fue propuesta por Hjort en 1914.

- *Estabilidad de la columna de agua:* Estudios en laboratorio realizados sobre la primera alimentación, indican que las larvas presentan cierta capacidad para detectar buenas concentraciones de alimento en el medio y por lo tanto, áreas de alimentación en el mar. Sin embargo, dicha capacidad se incrementa en un ambiente estable para la alimentación y/o ambientes de bajas turbulencias, debido a que el alimento no se encuentra distribuido en forma homogénea en la columna de agua, sino más bien formando estratos y agregaciones discretas. De esta forma, cualquier factor que afecte estas concentraciones

locales, tal como la turbulencia, reducirá la probabilidad que las larvas encuentren alimento suficiente afectando la sobrevivencia de éstas. Por otra parte, Lasker (1978, 1981, 1985) también menciona que la sobrevivencia de los estadios tempranos, depende no sólo de una adecuada concentración de alimento, sino también que el alimento tenga un tamaño y una composición adecuada para permitir el éxito de la alimentación larval.

- *Eventos Lasker*: Bakun & Parrish (1980) notaron que es probable que la intensidad de mezcla promedio no sea crucial en la hipótesis de Lasker, sino más bien la ocurrencia de “ventanas temporales”, durante las cuales la producción de energía de mezcla turbulenta permanezca lo suficientemente baja por un periodo tal que permita la acumulación de estratos con partículas de alimento concentrados para que la primera alimentación larval sea exitosa.

- *Ajuste/Desajuste*: Cushing (1975, 1990) hace relación con el ajuste entre los ciclos reproductivos y los ciclos de productividad local. La hipótesis predice que cuando se observa una sobreposición entre los peaks de abundancia larval y los peaks de productividad, mayor cantidad de larvas podrían sobrevivir.

#### *b) Advección*

Las hipótesis de advección dicen relación con el transporte, o la retención de huevos y larvas en el área de crianza (Iles & Sinclair, 1982). Los autores señalan que esta hipótesis es de especial importancia en las áreas de surgencia costera, debido al gran movimiento de masas de aguas fuera de la costa producto del transporte Ekman. Estudios comparativos en estas regiones, indican que los clupeidos tienden a desovar en áreas y momentos donde las surgencias costeras son mínimos, pudiendo evitar el riesgo que huevos y larvas sean transportados hacia áreas oceánicas de baja producción (Parrish *et al.*, 1983).

#### *c) Predación*

La predación entre organismos marinos es fuertemente dependiente del tamaño, entonces se podría pensar que las altas temperaturas pueden aumentar la sobrevivencia de los estadios tempranos a través de un crecimiento más rápido, tal que permita a los huevos y larvas salir rápidamente de etapas altamente susceptibles de predación (Laurence, 1990).

### 3.7.1.2 Teorías de síntesis

Ninguna de las hipótesis mecanicistas por si solas podría determinar el éxito del reclutamiento en un sistema de surgencia. En estos sistemas, los procesos advectivos, la estabilidad vertical de la columna de agua, la temperatura, la producción y la mezcla turbulenta actúan simultáneamente en la determinación del éxito reproductivo, acorde con los efectos en la alimentación, crecimiento y retención de los primeros estadios. Por esta razón, las teorías de síntesis han sido propuestas para unir las hipótesis mecanicistas en un único modelo conceptual.

Cole & McGlade (1998) señalan que existen dos teorías de síntesis que explican el éxito en el reclutamiento de clupeiformes: la “tríada” de Bakun (1996) y la “ventana ambiental óptima”.

- *La tríada de Bakun*

La teoría de la tríada (Bakun, 1996), generaliza tres importantes categorías de procesos oceanográficos para el éxito reproductivo:

- i) El enriquecimiento trófico de la columna de agua,
- ii) La retención de huevos y larvas dentro de áreas favorables,
- iii) La concentración de las partículas de alimento para la primera alimentación larval y subsecuentes estadios de desarrollo.

Dentro de un sistema de surgencia, el enriquecimiento es el resultado del proceso del transporte vertical de nutrientes desde aguas profundas a la superficie por la acción del viento paralelo a la costa; la retención proviene de la reducción del transporte mar afuera por advección de las masas de aguas dentro del sistema; y la concentración está señalada acorde con la formación de termoclinas y la presencia de frentes donde las partículas de alimento tienden a concentrarse. Dado que las condiciones físicas que conducen el enriquecimiento versus los procesos de retención y concentración son mutuamente excluyentes, la variabilidad espacio-temporal de la dinámica física de estos sistemas es importante en el balance entre estos procesos para permitir un reclutamiento exitoso.

- *Ventana ambiental óptima*

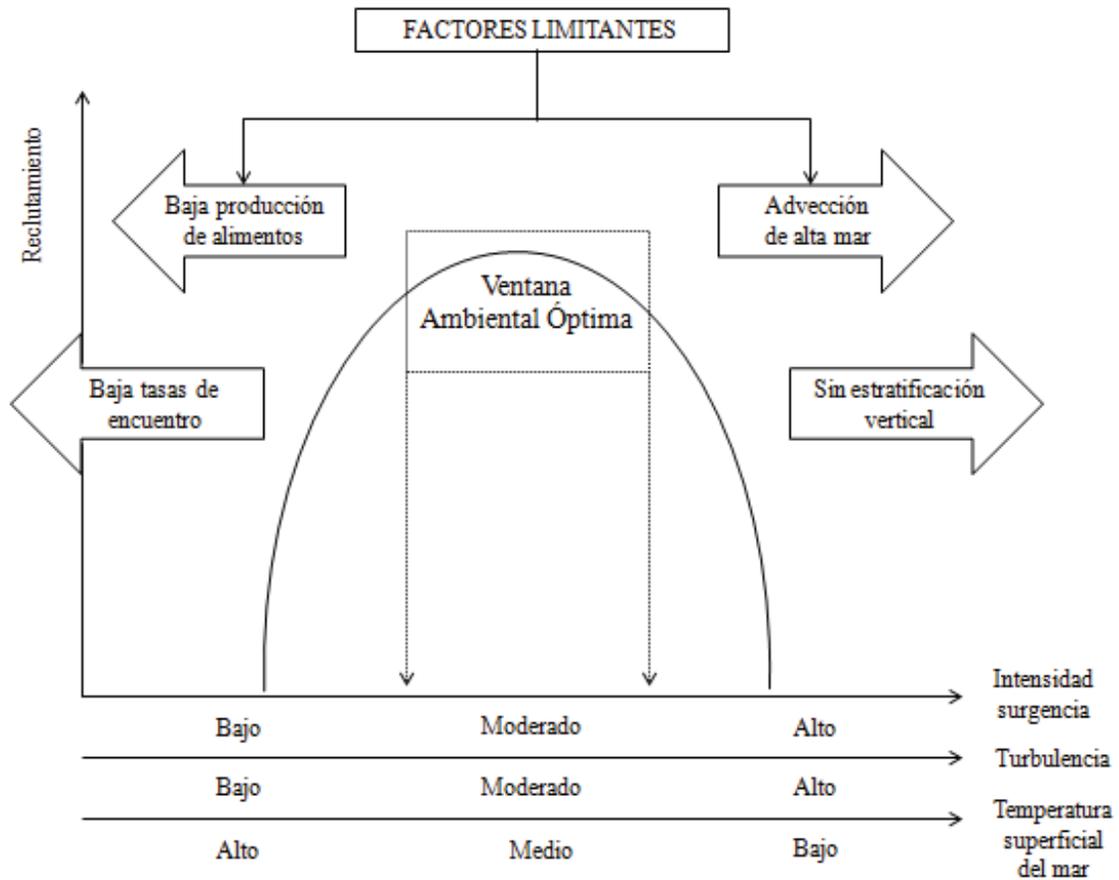
Fue propuesta por Cury & Roy (1989) y realza la importancia que presenta el balance entre la actividad de la surgencia, que enriquece la zona fótica, y los periodos de calma que permiten una adecuada retención larval.

En los sistemas de surgencia la advección vertical, la entrada de nutrientes en la capa fótica, y la turbulencia están estrechamente relacionados con la intensidad del viento. Por lo tanto en estos sistemas, un aumento en la intensidad de la surgencia desde débil a moderada podría determinar un incremento en la producción primaria, y consecuentemente la disponibilidad de alimento larval, con efectos positivos para la sobrevivencia y el posterior reclutamiento.

Por otra parte, una fuerte intensidad en la surgencia podría tener efectos negativos en el reclutamiento de especies pelágicas debido a que, aunque se incremente la producción primaria, la alta mezcla inducida por el viento podría disgregar las agrupaciones de alimento. En este contexto, debe existir una relación no lineal, entre el reclutamiento y el índice de surgencia, generándose una ventana ambiental óptima en niveles moderados de intensidad del viento.

La ventana ambiental óptima de Cury & Roy (1989) fue respaldada mediante el método comparativo considerando el reclutamiento de los stocks de cupleiformes de los sistemas de surgencia del oeste de África, Perú y California con respecto a la turbulencia generada por el viento y el tamaño del stock desovante. Los resultados mostraron una “ventana ambiental óptima” consistente en todos los casos donde el éxito reproductivo es favorecido. En otras palabras, una estrecha banda de velocidad del viento ubicada entre los 5-6 m/s, ni tan alta como para causar mezcla turbulenta y transporte fuera de la costa, ni tan baja como para impedir el enriquecimiento de la capa superficial del mar a través de la surgencia costera y mezcla de aguas.

La figura 7, explica que la curva tiene dos factores limitantes, por un lado (izquierdo) muestra la baja productividad, producto de la baja intensidad de surgencia, y por el otro lado (derecho) el factor limitante de la alta turbulencia que afecta directamente la formación del alimento óptimo. Por último el lugar donde ambos factores limitantes son minimizados y el reclutamiento es maximizado se denomina “Ventana Ambiental Óptima”.



**Figura 7.** Teoría de la ventana ambiental óptima en el reclutamiento de clupeoides, en regiones de surgencia (Fuente: Cury & Roy, 1989; TSM Modificada por Cole & Mcglade, 1998).

### 3.8 Experiencias con ventanas ambientales óptimas

Con el correr del tiempo y en distintas partes del mundo, se han realizado diversos estudios para dar explicación a las fluctuaciones del reclutamiento y la posible relación con las variables explicatorias, las cuales son conformadas por la biomasa desovante y variables ambientales como índices de surgencia, turbulencia, índice de clorofila, TSM entre otras, tal como lo muestra la Tabla 1.

**Tabla 1.** Trabajos realizados sobre reclutamiento y su relación con variables ambientales explicatorias y métodos utilizados.

Autor	Año	Lugar	Especie	Métodos*	Velocidad Viento [m/s]	TSM °C
Mendelssohn y Mendo	1987	Perú	<i>Engraulis ringens</i>	AVAS	6-7	-
Mendelssohn et al.	1989	Perú	<i>Engraulis ringens</i>	ACE GAM	5,8-6,7	-
Cury y Roy	1989	Perú Morocco Senegal	<i>Engraulis ringens</i> <i>Sardinops sagax</i> <i>caerulea</i>	ACE	5-6	-
Serra et al.	1998	Perú-Chile	<i>Sardinops sagax</i>	ACE	7,11	-
Payá et al.	1998	Valparaíso Talcahuano Chile	<i>Merluccius gayi</i>	ACE	5-6	-
Yañez & Espindola	1998	Norte de Chile	<i>Sardinops sagax</i>	ACE	-	17,7
Tascheri et al.	1999	Valparaíso Talcahuano Chile	<i>Merluccius gayi</i>	ACE	5-6	-
Cole	1999	Northern Benguela	<i>Engraulis capensis</i> <i>Sardinops sagax</i>	ACE	-	17-19 19-21
Yañez et al.	2001	Norte de Chile	<i>Engraulis ringens</i> <i>Sardinops sagax</i>	ACE	5,5 5,6	-
Yañez et al.	2003	Norte de Chile	<i>Engraulis ringens</i> <i>Sardinops sagax</i>	ACE	5,46 5,61	-
Jablonski	2004	Suroeste de Brasil	<i>Sardinella brasiliensis</i>	GAM ACE AVAS	3-4,5	24,75- 25,5

\*ACE: Alternating conditional expectation algorithm of Breiman and Friedman (1985).  
 GAM: Generalized additive models algorithm of Hastie & Tibshirani (1990).  
 AVAS: Additivity and variance stabilization algorithm of Tibshirani (1988).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Zona y período de estudio

La zona de estudio comprende el stock sur de Perú y norte de Chile, el cual está delimitado por los 16°S (Perú) y 24°S (Chile) (Serra, 1983). El período de estudio es de carácter semestral de 1984 al 2010.

### 4.2 Fuente y naturaleza de la información

Para analizar la existencia de la ventana ambiental óptima de anchoveta en el stock sur de Perú y norte de Chile, es necesario determinar la relación existente entre el reclutamiento y variables explicatorias: la biomasa desovante y variables ambientales. Con este fin, se cuenta con la siguiente base de datos:

- a) Reclutamiento (R) y biomasa desovante (BD): Éstos son entregados por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) a través del sistema de transparencia del gobierno de Chile ([www.subpesca.cl](http://www.subpesca.cl)). El documento lleva por nombre “Actividad 1: Peces pelágicos: anchoveta y sardina española XV, I y II Regiones 2011”, y son ajustados bajo el modelo estadístico de captura a la talla (MECT) (Tabla 2).
- b) Variables ambientales: Índice de surgencia (IS; Bakun *et al.*, 1974), índice de turbulencia (IT; Elsberry & Garwood, 1978) y temperatura superficial del mar (TSM). Estos antecedentes son entregados por el laboratorio de Evaluación y Oceanografía Pesquera de la Escuela de Ciencias del Mar de la PUCV y son analizados como promedios mensuales (1984-2010) en las estaciones meteorológicas y oceanográficas de Antofagasta (23°26'S) (Tabla 3).

**Tabla 2.** Reclutamiento (R) y Biomasa Desovante (BD) (semestral) de anchoveta del stock sur de Perú y norte de Chile estimado, con el modelo estadístico de captura a la talla (MECT). (Fuente: Instituto de Fomento Pesquero).

Año	Sem.	BD (i-1)	R (i)	Año	Sem.	BD (i-1)	R (i)
1984	1	279.715	192,489	1998	1	495.385	182,624
	2	503.669	75,994		2	1.034.290	107,307
1985	1	2.059.490	93,208	1999	1	2.378.160	81,284
	2	2.599.950	33,439		2	2.366.970	59,788
1986	1	2.748.680	53,932	2000	1	2.186.760	99,036
	2	1.870.520	67,165		2	1.585.550	53,546
1987	1	1.203.390	176,411	2001	1	1.562.330	167,515
	2	1.526.330	126,265		2	1.406.230	13,401
1988	1	2.652.980	101,5	2002	1	2.215.010	39,193
	2	3.011.740	35,19		2	1.844.320	77,537
1989	1	2.740.120	110,86	2003	1	1.057.170	153,115
	2	1.748.210	79,604		2	1.313.020	127,865
1990	1	1.784.860	91,498	2004	1	2.144.590	182,079
	2	1.856.290	30,493		2	1.969.070	86,077
1991	1	1.989.320	162,96	2005	1	2.227.380	105,362
	2	1.489.520	63,285		2	1.625.420	50,017
1992	1	2.215.750	107,844	2006	1	1.651.620	133,256
	2	1.607.620	125,046		2	1.223.670	45,923
1993	1	1.581.930	268,617	2007	1	1.562.060	87,016
	2	1.887.050	122,379		2	928.988	70,213
1994	1	3.076.980	174,079	2008	1	847.286	81,343
	2	2.543.750	75,102		2	681.118	27,365
1995	1	2.357.420	102,278	2009	1	850.218	51,945
	2	1.428.510	33,3		2	535.434	61,996
1996	1	1.653.370	169,445	2010	1	472.668	69,604
	2	1.369.770	46,248		2	-	-
1997	1	1.695.750	42,609				
	2	638.740	82,985				

i = semestre  
 BD (toneladas)  
 R (n° individuos x 109)

**Tabla 3.** Variables ambientales índice de surgencia (IS), índice de turbulencia (IT) y temperatura superficial del mar (TSM), períodos semestrales del 1984- 2010. (Fuente: Laboratorio de evaluación y oceanografía pesquera ECM - PUCV)

Año	Sem.	ÍS (i-1)	ÍT (i-1)	TSM (i-1)	Año	Sem.	ÍS (i-1)	ÍT (i-1)	TSM (i-1)
1984	1	663	154	15,6	1998	1	540	98	15,3
	2	856	217	20,4		2	605	121	18,8
1985	1	908	209	15,5	1999	1	464	81	15,5
	2	826	216	19,2		2	609	127	19,6
1986	1	562	134	15,6	2000	1	441	92	15,1
	2	905	224	20,3		2	595	125	19,8
1987	1	583	147	16	2001	1	524	107	15
	2	862	206	19,9		2	606	126	19,6
1988	1	767	179	15,2	2002	1	538	98	15,2
	2	968	247	19,5		2	639	134	19,8
1989	1	626	134	15,3	2003	1	470	87	15
	2	865	217	19,9		2	650	137	19
1990	1	659	141	15,4	2004	1	466	95	15,3
	2	803	191	18,9		2	619	130	19,5
1991	1	634	137	15,9	2005	1	543	108	15,2
	2	770	178	19,4		2	693	142	19,7
1992	1	511	112	15,2	2006	1	442	91,5	15,5
	2	828	198	19,6		2	635	132	19,8
1993	1	397	104	15,5	2007	1	635	115	14,1
	2	758	205	18,6		2	598	119	19,5
1994	1	475	150	15,9	2008	1	460	77	15,6
	2	714	194	20		2	694	142	18,6
1995	1	465	143	15,6	2009	1	529	95	15,1
	2	728	198	19,8		2	667	138	18,3
1996	1	543	142	15	2010	1	481	84	14,5
	2	501	123	19,6		2	-	-	-
1997	1	351	94	17,9					
	2	736	159	21,7					

IS ( $m^3/s/1000$  m costa)

IT ( $m^3/s^3$ )

TSM ( $^{\circ}C$ )

### 4.3 Métodos estadísticos

Con el fin de analizar la relación ó el efecto que tienen las variables explicatorias sobre el reclutamiento (variable dependiente), se ajustan normalmente modelos lineales múltiples que incluyen variables independientes como surgencia, turbulencia, temperatura superficial del mar y biomasa desovante (Anda *et al.*, 1994). Es esperable que estas variables presenten un alto grado de correlación, lo que puede generar problemas serios de multicolinealidad en el ajuste del modelo de regresión, situación no deseable en la que una de las variables independientes es una función lineal de otras variables independientes.

Hasta ahora los estudios realizados emplean un modelo estadístico en base anual que no necesariamente representa de manera adecuada la dinámica del recurso. En el caso de la anchoveta, se ha propuesto un nuevo enfoque de evaluación de stock (actualmente sujeto a revisión), obedeciendo a las dudas que han surgido sobre la determinación de la edad y sobre la conveniencia de utilizar períodos anuales de análisis, debido a que es una especie de vida corta, con un largo período reproductivo y por ello, un largo período de reclutamiento a la pesquería. Esto significa que la dinámica poblacional de este recurso es representada de mejor forma considerando períodos de análisis menores que un año. Por ello, en el presente estudio se explora un enfoque de modelamiento semestral considerando como primer semestre el desove principal de la especie, que ocurre entre los meses de julio – septiembre, los cuales son reclutados a la pesquería dentro de los 6 meses posteriores al desove esto es, a partir diciembre. El segundo semestre que corresponde al desove secundario, ocurre en el periodo diciembre – enero cuyos peces son reclutados a partir de junio próximo.

Consecuentemente, los datos de las variables ambientales: IS; IT y TSM, son correlacionados con el reclutamiento para determinar los periodos que mejor explican la relación existente entre ellos, considerando periodos temporales de 2, 3 y 6 meses luego de ocurrido el desove. La mayor correlación obtenida para el primer semestre (desove principal) corresponde al promedio de los tres meses siguientes al desove ( $i-1$ ), es decir, los meses julio-agosto-septiembre. Por otro lado, para el segundo semestre (desove secundario), la mejor correlación se exhibe para el promedio de los dos meses subsiguientes al desove ( $i-1$ ), esto es entre diciembre-enero. Otros periodos de análisis no dan lugar a una mayor correlación.

Los métodos rutinarios de análisis estadístico, como regresiones lineales son generalmente inadecuados para detectar y cuantificar los efectos ambientales (Maravelias & Reid, 1997), puesto que éstas pueden enmascarar relaciones no – lineales entre las variables. Por el contrario, los modelos aditivos generalizados (GAM) son técnicas de regresión no paramétrica utilizadas en investigaciones para comparar datos biológicos con variables ambientales (Swartzman *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2008).

De modo de considerar la posible no – linealidad de los efectos positivos o negativos de las diversas variables ambientales y la biomasa desovante, se analizan estas relaciones mediante técnicas estadísticas no paramétricas: ACE (Breiman & Friedman, 1985); AVAS (Tibshirani, 1988) y GAM (Hastie & Tibshirani, 1990) con el fin de estimar transformaciones óptimas para regresiones múltiples, evaluando diversos ajustes y determinando aquellos que representen de mejor forma el comportamiento de estas variables.

#### **4.3.1 Correlaciones entre reclutamiento y variables ambientales en diferentes periodos**

Con el fin de estudiar la variabilidad del reclutamiento (variable dependiente) y, considerando que las condiciones ambientales previas son críticas para la supervivencia de las etapas tempranas de vida, se han seleccionado distintos periodos de tiempos para obtener una correlación significativa entre el reclutamiento semestral y los factores ambientales.

Estos períodos se establecen según el semestre, considerando el intervalo de tiempo que contenga el desove y la mayor parte del periodo de desarrollo de los huevos, larvas y estados juveniles de la anchoveta. Por lo anterior, los factores ambientales considerados (IS, IT, TSM) se calculan mediante la adición de las medias mensuales en periodos específicos.

#### **4.3.2 Alternating conditional expectation ACE (Breiman & Friedman, 1985)**

El algoritmo ACE, determina funciones de transformación óptima por medio de un algoritmo iterativo que permite el cálculo de las funciones no – lineales  $T_j$  (Transformación), las cuales no pertenecen a una familia parametrizada en particular. Así, la técnica corresponde a regresiones no paramétricas que estiman transformaciones tanto para la variable dependiente (reclutamiento) como para las independientes (IS, IT, TSM y BD). El algoritmo converge a una solución óptima y no produce una ecuación dada, sino más bien una transformación suavizada y empírica para cada variable. La transformación no es expresada en una unidad dada y la curva se determina de forma gráfica, contrastando los valores transformados de una variable con sus valores originales.

Usualmente, los modelos de regresión múltiple tienen una variable respuesta aleatoria  $Y$  y  $p$  variables predictoras aleatorias  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Un conjunto de  $n$  realizaciones independientes de estas variables aleatorias es observado denotándose

por  $(y_1, x_{11}, \dots, x_{1p}), \dots, (y_n, x_{n1}, \dots, x_{np})$  y es deseable estimar la esperanza condicional  $E(Y/X_1, X_2, \dots, X_p)$ , para cada una de ellas. El modelo de regresión lineal asume que la esperanza condicional es lineal, y tiene la siguiente forma:

$$E(Y / X_1, X_2, \dots, X_p) = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_p \cdot X_p$$

Dada una muestra, los estimados de  $b$  ( $b_0, b_1, \dots, b_p$ ) son normalmente encontrados por mínimos cuadrados. Una generalización natural es considerar modelos aditivos no – lineales (Hastie & Tibshirani, 1990) de la forma:

$$E(Y / X_1, X_2, \dots, X_p) = \sum_{j=1}^p T_j(X_j)$$

Donde las funciones no – lineales  $T_j$  deben ser estimadas. El algoritmo de Breiman & Friedman (1985) estima los  $T_j$  como el promedio de los datos cercanos a un determinado punto, a través de un ploteo suavizado. Así, la variable de respuesta  $Y$  y las variables predictoras  $X_1, X_2, \dots, X_p$  son reemplazadas por funciones de transformación  $T_1(Y), T_2(X_1), \dots, T_{p+1}(X_p)$  y el algoritmo estima estas funciones minimizando el valor de:

$$e^2 = \frac{E \left[ \left( T_1(Y) - \sum_{j=1}^p T_{j+1}(X_j) \right)^2 \right]}{VAR(T_1(Y))}$$

Estas transformaciones óptimas se derivan únicamente de los datos, por tanto no requieren de supuestos respecto a la forma funcional para la respuesta o las variables de predicción, proporcionando así una herramienta poderosa para el análisis exploratorio de datos. Se pueden producir resultados anómalos si  $e^2$  ó  $T_j(X_i)$  no satisfacen los supuestos de independencia y normalidad.

### 4.3.3 Additivity and variance stabilization AVAS (Tibshirani, 1988)

Uno de los problemas que presenta el algoritmo ACE es que las transformaciones maximizan las asociaciones lineales, introduciendo con esto heterocedasticidad en la variable respuesta. El algoritmo AVAS soluciona este problema ya que impone una transformación a la estabilización de la varianza de las variables explicativas. AVAS evita

al menos dos de las deficiencias del ACE en las aplicaciones de regresión: la reproducibilidad de la transformación de los modelos y la eliminación de la simetría entre la respuesta y las variables explicativas.

Al igual que ACE, AVAS es un modelo aditivo que determina transformaciones  $\theta, \phi_1, \dots, \phi_p$  para las variables  $Y, X_1, \dots, X_p$ , de modo que:

$$\theta(Y) = \phi_1(X_1) + \dots + \phi_p(X_p) + \varepsilon \quad (1)$$

El método escoge transformaciones  $\theta(Y)$  logrando la estabilización de la varianza como especial característica, de esta forma, se asume que la esperanza y varianza condicional, quedan determinadas por:

$$E[\theta(Y) | X_1, \dots, X_p] = \sum_{i=1}^p \phi_i(X_i) \quad (2)$$

$$Var[\theta(Y) | \sum_{i=1}^p \phi_i(X_i)] = \text{constante} \quad (3)$$

La estructura aditiva descrita en la ecuación (2), se compone de  $p$  funciones de transformación, determinadas mediante el siguiente algoritmo:

$$\phi_k(X_k) = E[\theta(Y) - \sum_{i=1}^k \phi_i(X_i) | X_k] \quad (4)$$

De esta forma, se efectúan ciclos iterativos de  $k = 1, 2, \dots, p$ , hasta obtener convergencia. La estabilización de la varianza viene dada por la ecuación (2). Como en el caso de ACE, AVAS estima  $\theta(Y)$  y  $\phi_i(X_i)$ . Estas transformaciones son calculadas satisfaciendo las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), en que en esta última, se utiliza un suavizador, el scatterplot smoother.

#### 4.3.4 Generalized additive models GAM (Hastie & Tibshirani, 1990)

El GAM es un método semi-paramétrico que mediante funciones suavizadas determina la forma de la relación entre la variable respuesta y las variables predictoras (Swartzman, 1997; Piet, 2002; Cianelli *et al.*, 2008). Para los GAM, las funciones son

aditivas y los componentes son suavizados (Hastie & Tibshirani, 1990; Wood & Augustin, 2002). Así los GAM son más flexibles, permitiendo aditivamente una combinación de formas lineales y complejas en el mismo modelo (Wood & Augustin, 2002). Finalmente, el modelo es determinado por la naturaleza de la relación entre la variable respuesta y las variables predictoras y no por alguna forma de relación paramétrica a priori (Hastie & Tibshirani, 1990; Peltonen *et al.*, 2007).

El GAM es un método estadístico, similar al de regresión clásica, pero con supuestos de distribución más generales. Además, no supone linealidad entre las covariables. Genéricamente el GAM tiene la siguiente estructura

$$E(Y) = g^{-1} \left( \beta_0 + \sum_k s_k(x_k) \right)$$

La función  $g(\cdot)$  es una función de enlace, la cual define la relación entre la respuesta y el predictor lineal  $\beta_0 + \sum_k s_k(x_k)$ . La respuesta,  $Y$ , se asume que se distribuye de acuerdo a una familia de distribuciones estadísticas, de tipo exponencial. El término  $x_k$  es el valor de la  $k$ -ésima covariable. El término  $\beta_0$  es un intercepto, y  $s_k(\cdot)$  es una función de suavizamiento unidimensional para la  $k$ -ésima covariable.

En general, los parámetros que se deben elegir en esta técnica son básicamente la familia de distribución, el tipo de suavizado y la función de unión que mejor se ajusta los datos. La familia de distribución puede ser cualquier función de la familia exponencial (Normal, Poisson, Binomial, etc.) a la que se ajuste mejor la distribución de la variable respuesta. El suavizado es una función que relaciona la variable respuesta con las variables predictoras mediante polinomios. El grado de suavizado de la curva es expresado mediante grados de libertad. La función de unión establece la relación entre la estimación de la variable respuesta y la función suavizada de la o las variables predictoras. La función de unión está directamente relacionada con la familia de distribución.

La gran ventaja de modelos GAM sobre métodos de regresión tradicionales es su capacidad para modelar no-linealidad utilizando suavizadores de dispersión, constituyéndose en una herramienta poderosa para análisis exploratorios tales que permitan identificar las relaciones funcionales sugeridas por los datos (Hastie & Tibshirani, 1990).

Se utiliza GAM con el fin de ajustar el mejor modelo arrojado por los algoritmos ACE y AVAS en cuanto al nivel de significancia más óptimo, ya que estos algoritmos sólo entregan un coeficiente de determinación  $R^2$  y no un valor crítico de probabilidad ( $p -$

$value < 0,05$ ). Adicionalmente, GAM permite calcular la bondad de ajuste del modelo en base a un pseudo-coeficiente de determinación ( $r^2$ ) (Swartzman *et al.*, 1992) que es calculado de la siguiente forma:

$$r^2 = 1 - \left( \frac{\text{residual deviance}}{\text{null deviance}} \right)$$

#### 4.4 Aplicación de los métodos estadísticos

##### 4.4.1 ACE y AVAS

En el desarrollo de este estudio, se estiman transformaciones óptimas entre la variable de respuesta y un set de variables predictoras utilizando las aplicaciones ACE, AVAS y GAM mediante el software estadístico S-PLUS 2000, aplicando el siguiente procedimiento:

- Crear un archivo Excel (respetando puntuación y escritura) con las variables a analizar.
- Importar la planilla creada en S-PLUS 2000 siguiendo la ruta:

=> *File => Import Data => From File => Tipo All File (\*.\*) => seleccionar archivo.*

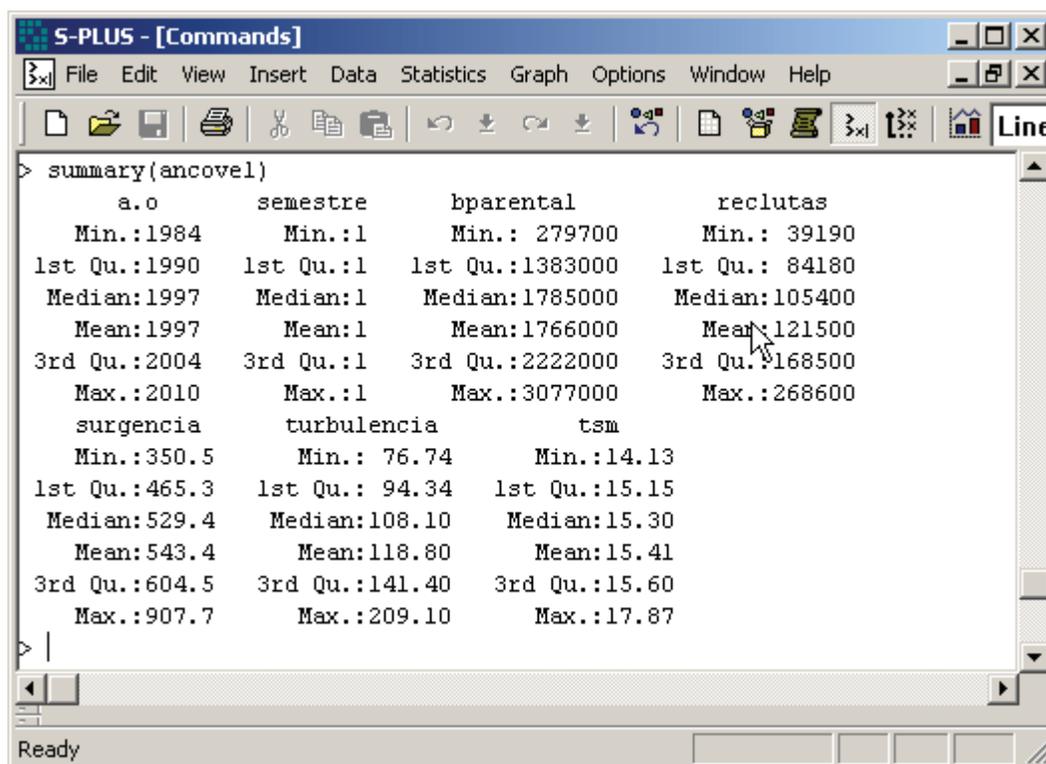
- Abrir la ventana de trabajo (*Commands Windows*) y llamar al archivo con el comando *attach(nombre archivo)*. Con esta acción el programa reconoce la matriz de trabajo que contiene los datos. Es recomendable usar la función *summary(nombre archivo)*, para visualizar un resumen de la información almacenada en éste (Fig. 8).
- Asignar un nombre a los vectores a utilizar en el análisis. Esto se realiza con el comando *cbind(nombre de la columna de datos)*, por ejemplo:

```
> y<- cbind(variable respuesta)
> x<- cbind(variables predictoras)
```

Para obtener las distintas transformaciones de las variables predictoras con la variable respuesta, es necesario hacer combinaciones del vector “x” dependiendo del modelo a utilizar. Por ejemplo, si se desea determinar la posible relación existente entre el

reclutamiento y la biomasa desovante, el vector “x” debe ser `>x>-cbind(BD)`; en caso de analizar una o más variables ambientales el vector “x” debe estar configurado como `>x<-cbind(IS,IT,TSM)` y así sucesivamente. Serra *et al.*, 1998 introduce en este tipo de análisis, una variable categórica Ecosystem Factor (EF) a fin de evaluar posibles repercusiones en la población producto de la existencia de periodos dominantes de biomasa de la anchoveta ó sardina, por lo tanto en este estudio se analiza el posible efecto dominante de los desoves primario y secundario de la anchoveta (Tabla 3), por ejemplo:

```
>y<-cbind(reclutamiento)
>x<-cbind(EF,BD,IS,IT,TSM)
```



**Figura 8.** Función Summary en S-PLUS 2000.

- Ejecutar los algoritmos ACE - AVAS según corresponda, para determinar transformaciones de las variables predictoras con la variable respuesta, tomando en cuenta los vectores (y, x) creados anteriormente con el comando cbind. Esto se realiza ejecutando la siguiente instrucción:

```
> nombre_archivo.ace<-ace(x,y)
> nombre_archivo.avas<-avas(x,y)
```

- Para visualizar la solución de estos algoritmos, se llama el archivo de la siguiente manera:

- > nombre archivo.ace
- > nombre archivo.avas

En este archivo se almacena cada una de las transformaciones correspondientes a cada variable, incluyendo el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), además del número de iteraciones con las que el algoritmo alcanza el nivel de convergencia (Fig. 9).

```

> anco.avas<-avas(x,y)
> anco.avas
$tx:
      1      2      3      4      5      6
-0.4290971 0.3628139 0.2317662 -0.3383256 0.3962785 0.2600203
      7      8      9     10     11     12
0.3571083 -0.2454352 0.2832539 -0.8588924 -0.3372407 0.31775

$ty:
[1] 0.37203112 2.41647816 -0.38341722 -0.23686147 1.23905325
[6] 0.07445828 0.34009060 0.14089671 -0.71156430 -1.35655689
[11] -0.92025936 -0.97434896

$rsq:
[1] 0.2175751

$iterations:
[1] 4

```

**Figura 9.** Transformaciones óptimas,  $R^2$  y número de iteraciones.

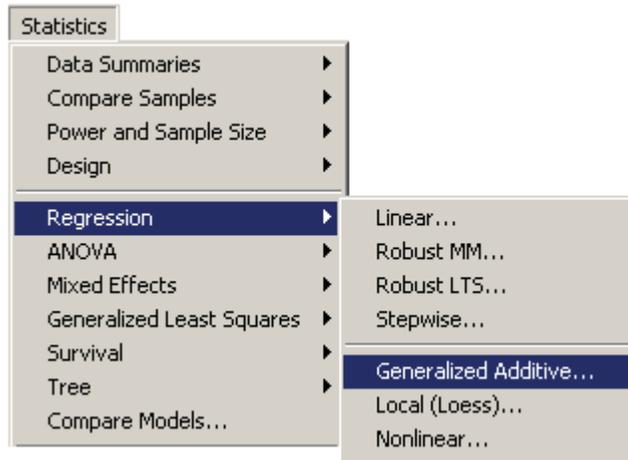
- Por último, se grafican los resultados de modo de contrastar los valores observados con los transformados por ACE – AVAS.

#### 4.4.2 GAM

Para aplicar este algoritmo, se considera el siguiente procedimiento:

- Abrir la ventana de modelos aditivos generalizados mediante la secuencia (Fig. 10):

=>Statistics =>Regression =>Generalized Additive Model

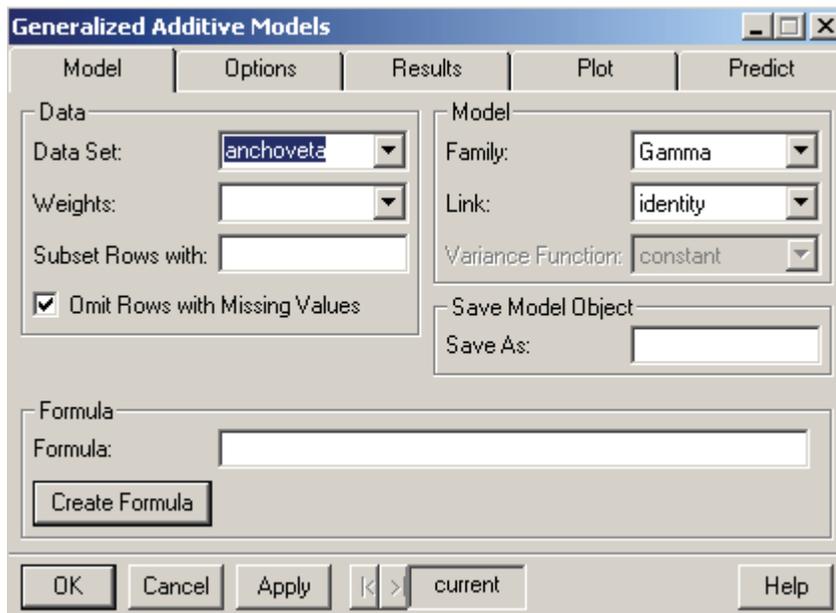


**Figura 10.** Ventana de comandos para iniciar GAM en S-PLUS 2000.

- Luego, se despliega la ventana de comandos (Fig. 11) donde es necesario ingresar la información requerida para el análisis: nombre del archivo (*Data Set*), familia de distribución de la variable respuesta (*Family*) y especificación del modelo (*Create Formula*).

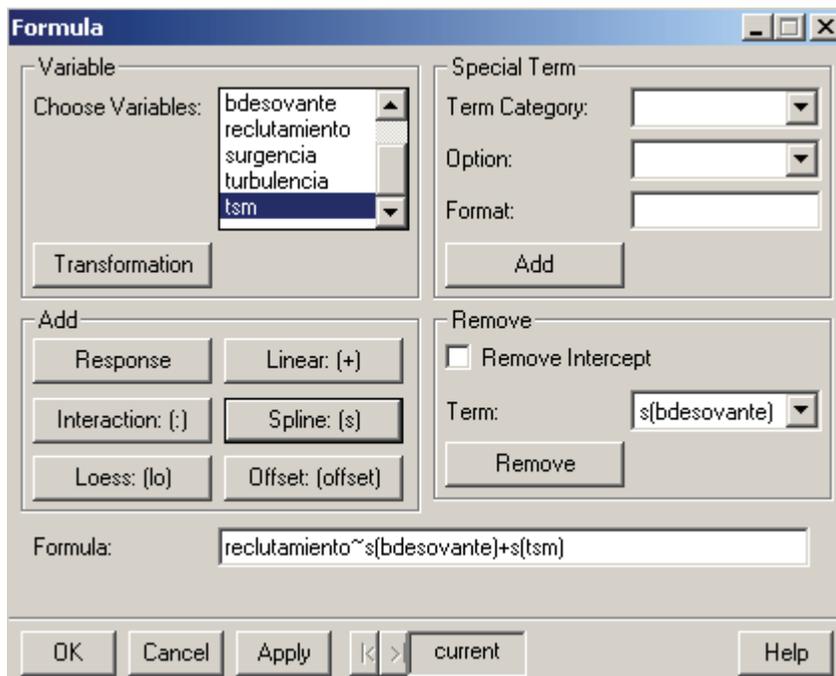
En GAM, es necesario establecer de manera anticipada la familia de distribución a la cual pertenece la variable dependiente (reclutamiento). A modo de inferir como se distribuyen los datos, se utiliza el software STATISTICA 7, en particular aplicando la siguiente secuencia de comandos =>*Distribution Fitting* => *Summary (opcional)* => *Plot of observed and expected distribution (Gamma)*. De forma gráfica y según el test Chi-square, los datos pertenecen a la familia de distribución Gamma (Anexo I)

- A continuación, se deben generar diversas combinaciones de variables predictoras de modo de determinar cuál de éstas explica de mejor forma la variable respuesta. Los modelos son generados en el campo *Create Formula*. Una vez seleccionado este ícono, se despliega la ventana *Formula* (Fig. 12). Para la elección del modelo, se usan funciones suavizadoras, ya sea *smoothing splines (s)* ó *loess smothers (lo)*. La elección de ellas dependerá del caso en particular, ya que ambos suavizadores cumplen la misma función y difieren sólo en su amplitud de banda, lo que hace que la curva este más o menos ceñida a la tendencia de los puntos (Beck & Jackman, 1996).

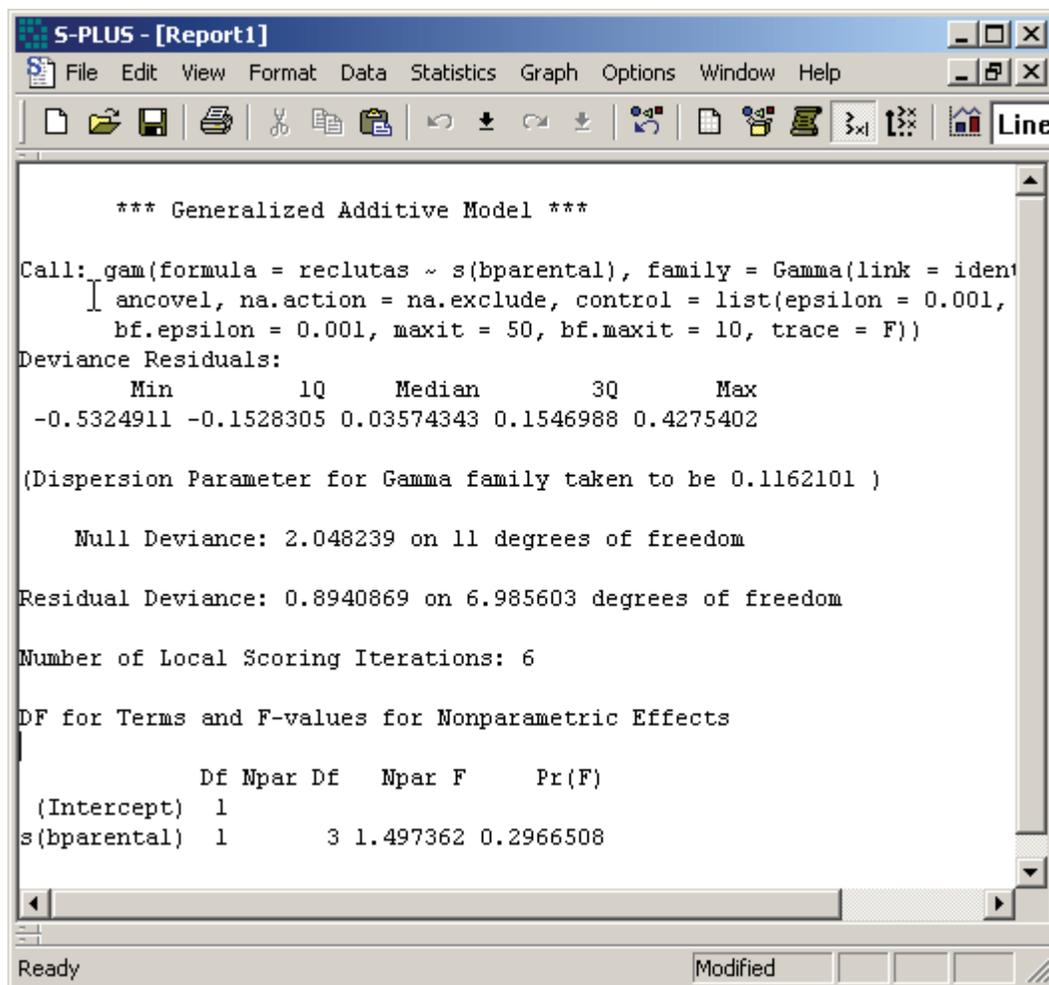


**Figura 11.** Ventana de comandos GAM.

Establecidas todas las opciones requeridas, se visualiza en el panel de comando el reporte de GAM, en el cual se especifica: el número de iteraciones; la devianza nula, es decir, el grado de desviación de la parte paramétrica de GAM; la devianza residual y la potencia  $Pr(F)$  la cual indica el nivel de significancia de la estimación (Fig. 13). Los ajustes parciales se observan en los gráficos que arroja la salida del algoritmo.



**Figura 12.** Ventana de comandos para la creación de modelos S-PLUS 2000.



**Figura 13.** Informe entregado por S-PLUS 2000 para GAM.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Análisis previos

Previo al análisis mismo y tal como indican los antecedentes, es necesario evaluar si el comportamiento que existe entre la variable respuesta y las variables explicativas (ambientales), corresponden a modelos lineales. Además, se desea determinar la aplicabilidad de modelos stock - reclutas clásicos para explicar el comportamiento particular de la anchoveta en el periodo de análisis. Por último, se determina la existencia o no de independencia entre las variables explicatorias, de modo evitar ajustes incorrectos que enmascaren relaciones directas entre las variables ambientales.

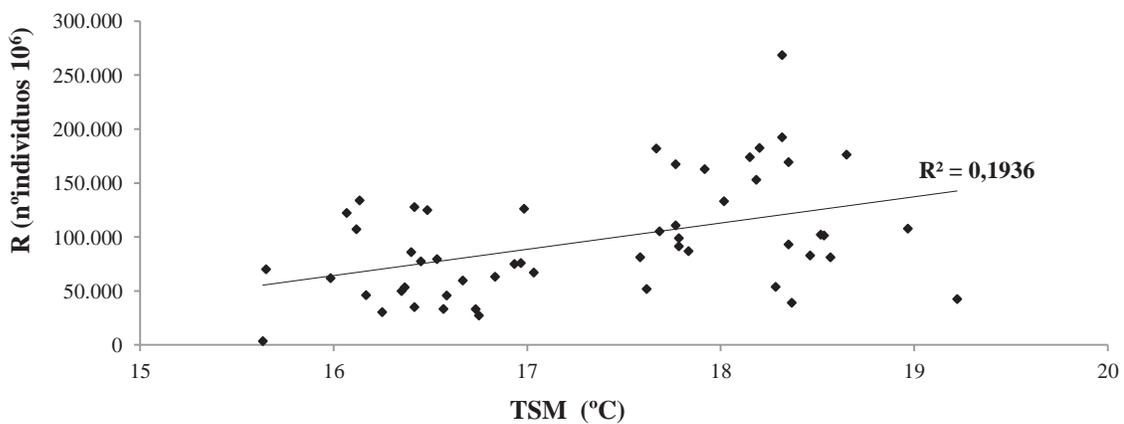
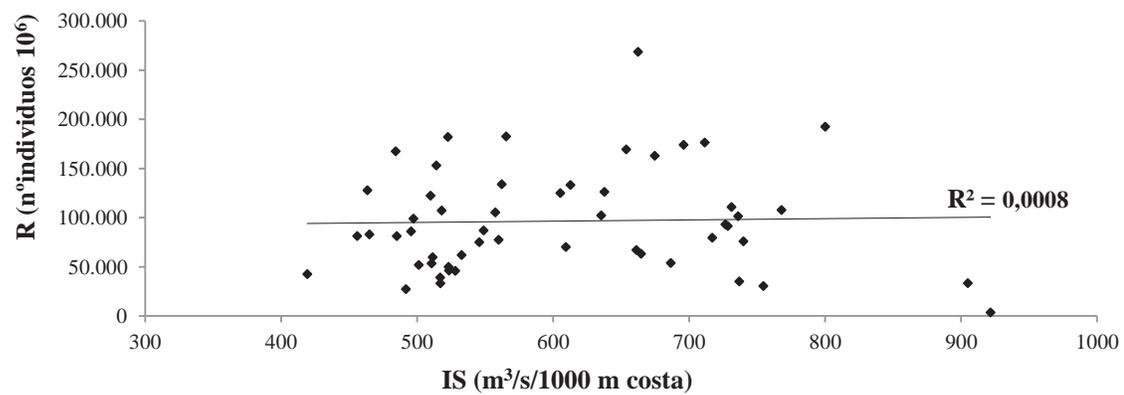
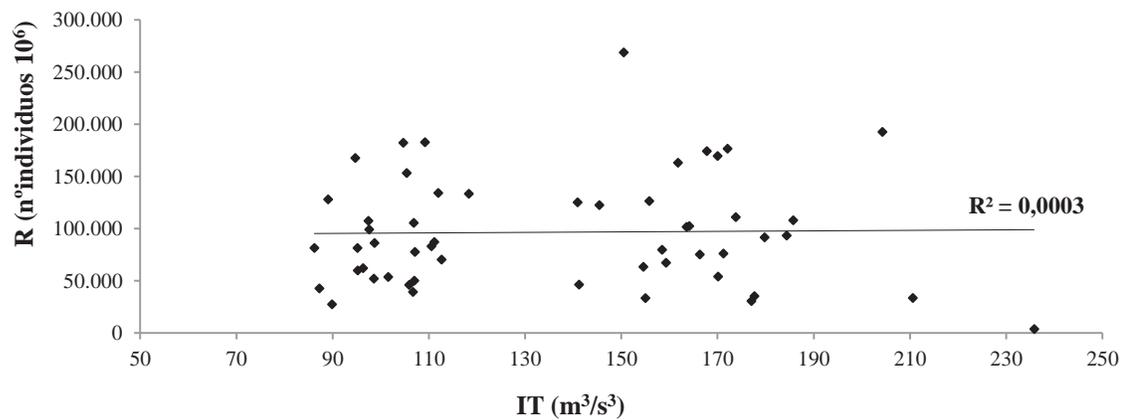
#### 5.1.1 Modelos lineales

En esta sección se evalúa la aplicabilidad de modelos de ajuste lineal. En este sentido, se modelan en forma lineal la variable respuesta frente a una de las variables ambientales consideradas. Es posible apreciar el bajo porcentaje de ajuste que entregan los modelos, lo que probablemente implica que la relación existente entre las variables es de características no-lineales. De esta forma, el uso de regresiones lineales (o transformaciones *a priori*) resulta en un enmascaramiento de las conexiones no-lineales existentes, generando problemas para determinar el real comportamiento de la especie frente a cambios en el medio ambiente.

En la figura 14, se muestra el comportamiento entre el R y las variables ambientales. Respecto del IS, se observa una baja correlación lineal ( $R^2 = 0,0008$ ), al igual que el IT con  $R^2 = 0,0003$ , mostrando gráficamente una alta dispersión de puntos y por lo tanto, un bajo ajuste. En el caso de la TSM, es posible explicar aproximadamente el 19% de la relación.

#### 5.1.2 Relación stock – recluta

Se han generado modelos de distinta complejidad para dar cuenta de la relación entre los reclutas y el stock parental (Quinn & Deriso, 1999), aunque los dos modelos stock-recluta mayormente usados en biología pesquera son el de Beverton & Holt (1957) y el de Ricker (1954).

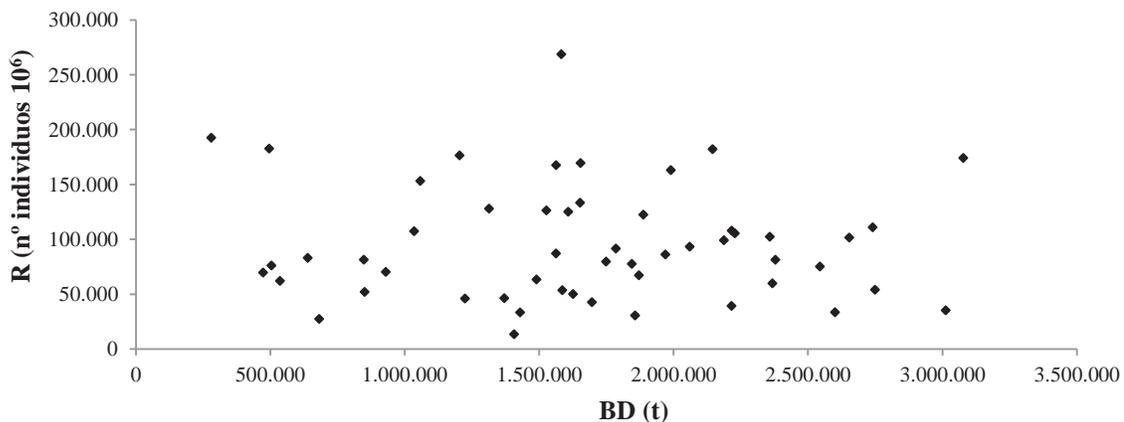


**Figura 14.** R de anchoveta en función del IT, IS y TSM.

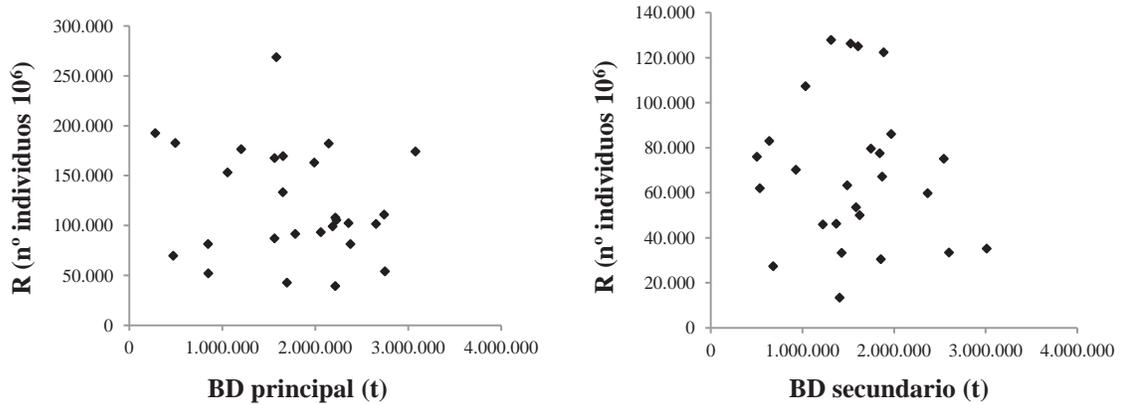
Los datos de BD y R son graficados con un desfase de 6 meses, ya que según el modelo estadístico de captura a la talla el desove ocurre al comienzo de cada semestre y lo mismo el R. Esto significa que la producción biológica del stock se distribuye en dos semestres. Vale decir, se supone que el recurso desova todos los semestres y así se explica la presencia de reclutas al inicio de cada semestre (enero y julio de cada año).

La figura 15 muestra que para un mismo nivel de BD, se puede presentar más de un nivel de R, es así que para 1,6 millones de toneladas, es posible tener valores de R tan fluctuantes como 2,6 mil millones en 1993 y cerca de 0,43 mil millones de individuos en 1997. Para ser más específicos, es necesario observar la figura 16, la que describe el comportamiento de los desoves primario y secundario, observando que no siguen ningún modelo clásico S/R, presentando gran variabilidad en el R versus la BD. En el caso del desove principal se puede apreciar esta fluctuaciones de 1,5 y 2,5 millones de toneladas y en el desove secundario entre 1 y 2 millones de toneladas.

Cabe destacar que el modelo considera períodos semestrales de desove, observándose R a la pesquería en gran parte del año y en verano se registra el más fuerte, aunque existe otro máximo secundario generalmente en invierno. Esto se confirma con los valores alcanzados del R por semestre (Fig. 16), donde se muestra que el desove principal ocurre para un máximo de 3 mil millones de individuos, mientras que el secundario sólo se aproxima a 1,4 mil millones de individuos.

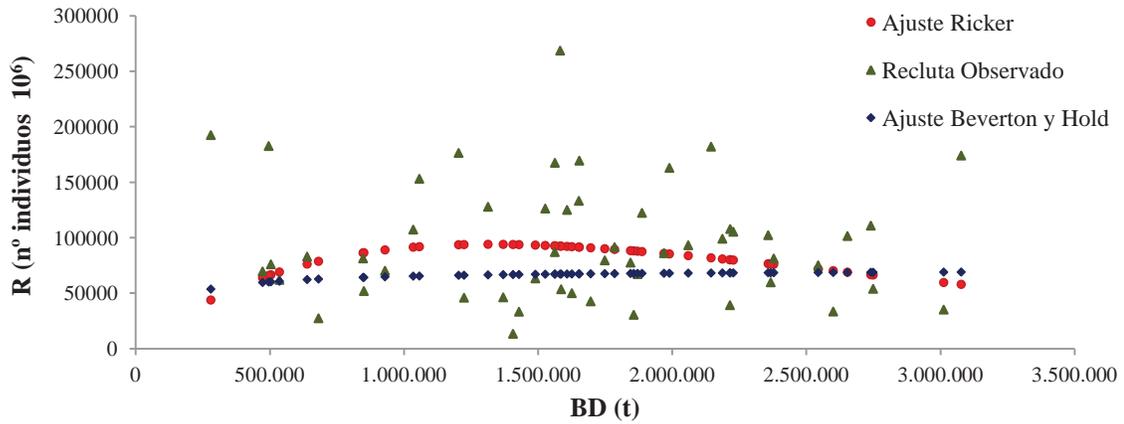


**Figura 15.** Relación entre la BD y el R.



**Figura 16.** Relación BD – R para el desove principal y secundario de anchoveta en el stock sur del Perú y norte de Chile, período 1984-2010.

Del análisis, se observa que la relación descrita por Ricker explica un 40% del ajuste, mientras que la propuesta por Beverton & Holt explica un 20% lo que concuerda con Serra & Canales (2010), tal como se muestra en la figura 17. Por lo tanto, dado el nivel de explicación del R debido a la BD, es oportuno cuantificar el grado de influencia que pudiesen tener los efectos ambientales sobre el R.



**Figura 17.** R observado v/s ajuste modelos clásicos de Ricker y Beverton & Hold para la anchoveta del stock sur del Perú y norte de Chile.

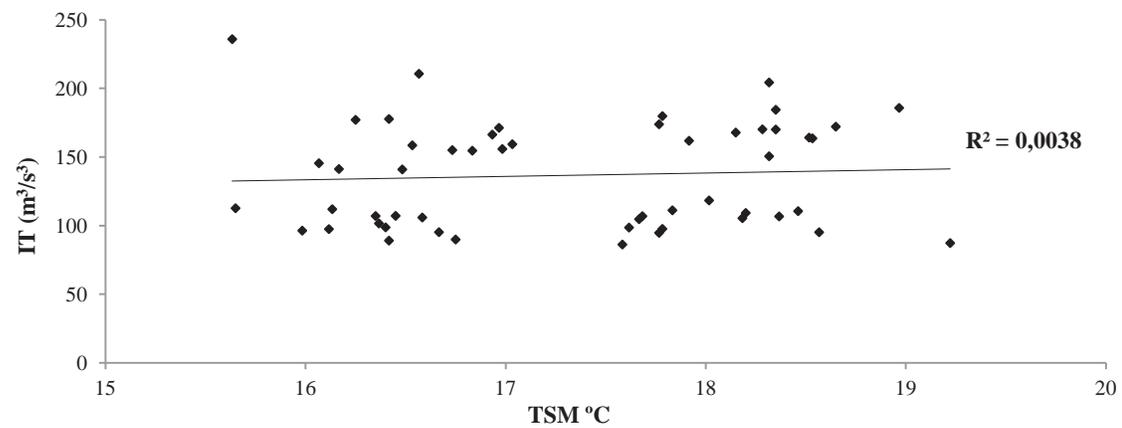
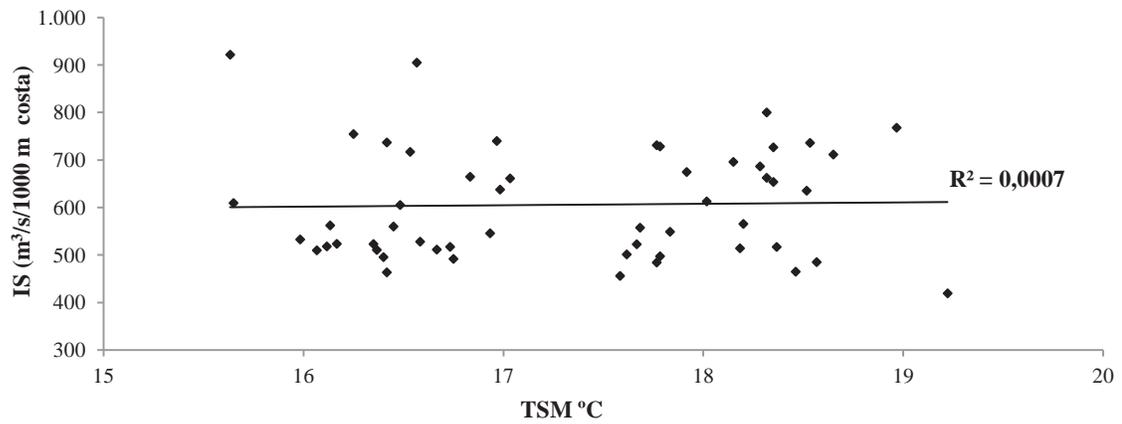
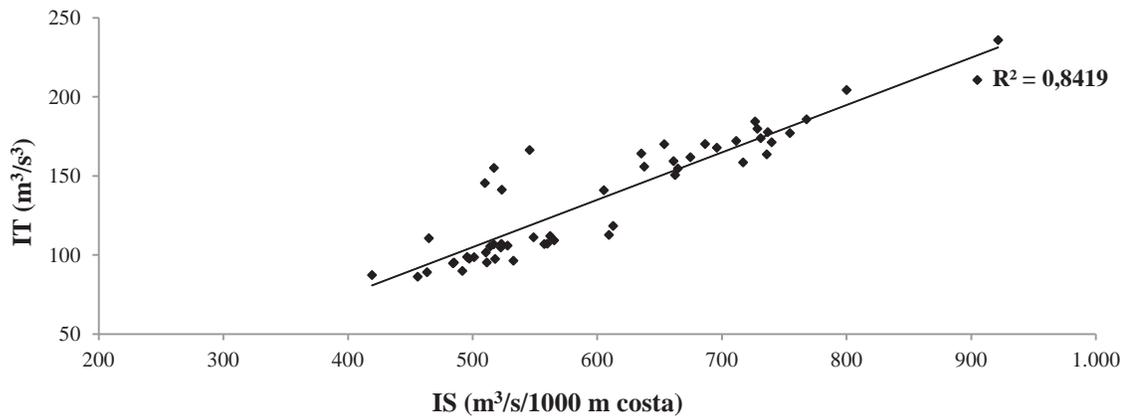
### 5.1.3 Relación entre variables ambientales

Según Montecinos (1991) la estación meteorológica que mejor representa las condiciones ambientales de la zona de estudio, corresponde a la estación de Antofagasta, ya que la existente en Arica no resulta representativa debido a que está bastante alejada de la costa hacia el noreste y podría más bien representar la interacción del flujo costero con las numerosas quebradas presentes en esta región. Por otra parte, en la frontera de Chile y Perú la línea de la costa pasa de una orientación sur-norte a una sureste-noroeste. Dado lo anterior, los datos ambientales son recogidos desde la estación meteorológica de Antofagasta, dado que muestra los registros más largos y representa bien la variabilidad en la zona de estudio, expresada en las fluctuaciones de la TSM (Montecinos *et al.*, 2003) y de la profundidad de la termoclina (Pizarro & Montecinos, 2004).

Se realiza un análisis de correlación entre las variables ambientales (IS, IT, TSM), para discriminar entre variables altamente correlacionadas, ya que la inclusión de estas puede afectar y redundar en valores altos de  $R^2$  y como consecuencia en modelos poco fiables. Cabe destacar que la información ambiental de la cual resulta la matriz de datos, es en base a promedios mensuales entre años; de esta información promediada se obtuvo la media de tres meses significativos para la especie, por lo cual este estudio infiere sus resultados sobre la base de un indicador, es decir, un cuantificador que compara el desempeño entre períodos.

Diversos análisis realizados (Cury & Roy, 1989; Anda *et al.*, 1994; Yáñez & Espindola, 1998), demuestran que el IS y IT están altamente correlacionados en zonas de orientación norte-sur. En efecto, ambos índices son calculados a partir del viento y en la zona norte los vientos predominantes del sur y sur-oeste son favorables a la surgencia (Pizarro *et al.*, 1994) y por ende al transporte hacia el oeste.

En la figura 18, se muestra el alto grado de correlación ( $R^2 = 0,84$ ) entre el IS – IT a nivel global. Respecto a la relación entre TSM - IS ( $R^2 = 0,0007$ ) se determina que existe baja correlación, al igual que en la relación entre TSM – IT ( $R^2 = 0,0038$ ). De este modo, se consideran excluidas en un mismo modelo las variables IS e IT, debido a su alta correlación. El análisis para determinar la independencia de las variables ambientales, considerando individualmente los desoves primarios y secundarios sigue la misma tendencia que el análisis global.



**Figura 18.** Relaciones entre variables ambientales durante el período de desove de anchoveta entre 1984 y 2010.

### 5.1.4 Correlaciones entre R y variables ambientales en diferentes periodos

Con el fin de estudiar la variabilidad del R y la influencia de las condiciones ambientales en los estadios tempranos, se analizaron diferentes periodos con el fin de obtener la mejor correlación entre los indicadores IS, IT y TSM con la variable R. Como muestra la Tabla 4, el periodo se define para el primer semestre como el promedio simple de los meses de julio– septiembre (i-1). De igual forma, el segundo semestre presenta mayores correlaciones en los meses de diciembre – enero (i-1).

**Tabla 4.** Ajustes entre el R y variables ambientales en diferentes periodos.

Semestre	Periodo	$R^2$		
		IS	IT	TSM
1°	Julio - Diciembre (i-1)	0,011	0,09	0,05
	Julio - Septiembre (i-1)	0,017	0,016	0,14
2°	Diciembre - Junio (i-1)	0,013	0,012	0,03
	Diciembre - Enero (i-1)	0,019	0,017	0,15

i = semestre

## 5.2 Modelos simples con ACE, AVAS y GAM

Se prueban diversos modelos que relacionan la variable respuesta con aquellas explicatorias (BD, IS, IT, TSM), obteniendo valores de correlación  $R^2$ , para los algoritmos ACE y AVAS. Luego, para determinar si dicha correlación es estadísticamente significativa, se corre el algoritmo GAM para cada modelo, obteniendo el nivel de significancia de la estimación ( $p$ ). Ahora, la elección del modelo explicatorio, se realiza en función del valor de significancia  $p$  y de la correlación existente entre la variable respuesta y la explicatoria. Esto es, se escogen en primera instancia aquellos modelos que sean estadísticamente aceptables ( $p \leq 0,05$ ), y de estos se seleccionan aquellos con los mayores niveles de correlación  $R^2$ .

Los modelos simples, los cuales consideran que la variable de respuesta es ajustada sólo por una variable explicatoria, muestran grados de correlación muy bajos pero aceptables estadísticamente (Tabla 5). En consecuencia, difícilmente el R es explicado sólo por una variable independiente. Por lo tanto, se procede a analizar modelos más complejos.

**Tabla 5.** Coeficiente de correlación  $R^2$  y  $p$ -values para modelos simples. ACE, AVAS y GAM.

Modelo	$R^2$			$p \leq 0,05$
	ACE	AVAS	GAM	
R = s(BD)	0,34	0,19	0,41	0,00084
R = lo(IS)	0,25	0,21	0,27	0,00013
R = lo(IT)	0,18	0,17	0,27	0,00011
R = s(TSM)	0,25	0,16	0,30	0,00660

### 5.3 Modelos complejos con ACE, AVAS y GAM

Se prueban modelos explicatorios que consideran diversas combinaciones de las variables independientes. Estos modelos se estructuran considerando siempre la BD (por su relación directa padre – hijo) en combinación, en primer lugar, con cada una de las variables ambientales (IT, IS, TSM) y en segundo lugar considerando la TSM con cada una de las variables dependientes (IS, IT). Además, se aplica un suavizamiento a las curvas determinadas mediante GAM, smoothing splines (s) ó loess smothers (lo), según el aporte que entreguen al ajuste del modelo. Los modelos complejos que mejor explican la relación entre la variable respuesta y las explicatorias, se describen en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Coeficiente de correlación  $R^2$  y  $p$ - values para modelos complejos. ACE, AVAS y GAM.

Nº	Modelo	$R^2$			$p \leq 0,05$
		ACE	AVAS	GAM	
1	R = BD+ s(IS)	0,64	0,58	0,63	0,023
2	R = BD+ s(IT)	0,57	0,52	0,53	0,007
3	R = s(BD)+ s(TSM)	0,86	0,80	0,82	0,014 *
					0,002 **
4	R = BD+ s(IS)+ s(TSM)	0,80	0,59	0,69	0,009 ***
					0,002 **
5	R = BD+IT+ lo(TSM)	0,80	0,52	0,58	0,040

\* s(BD)

\*\* s(TSM)

\*\*\* s(IS)

Las transformaciones de ACE y AVAS gráficamente son similares entre sí, tal como lo expuesto por Cury *et al.* (1995), donde mencionan que si bien estos algoritmos tienen criterios de convergencia distintos, sus transformaciones son muy semejantes entre sí. (Figs. 19 - 33).

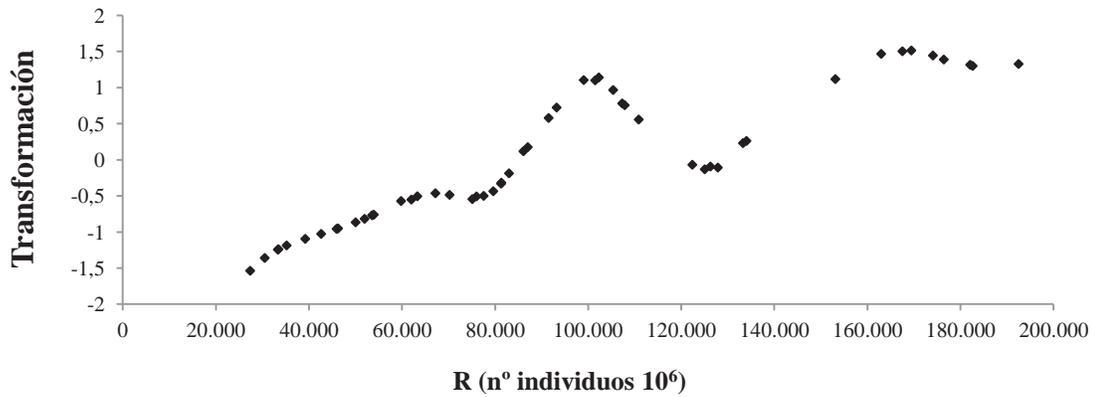
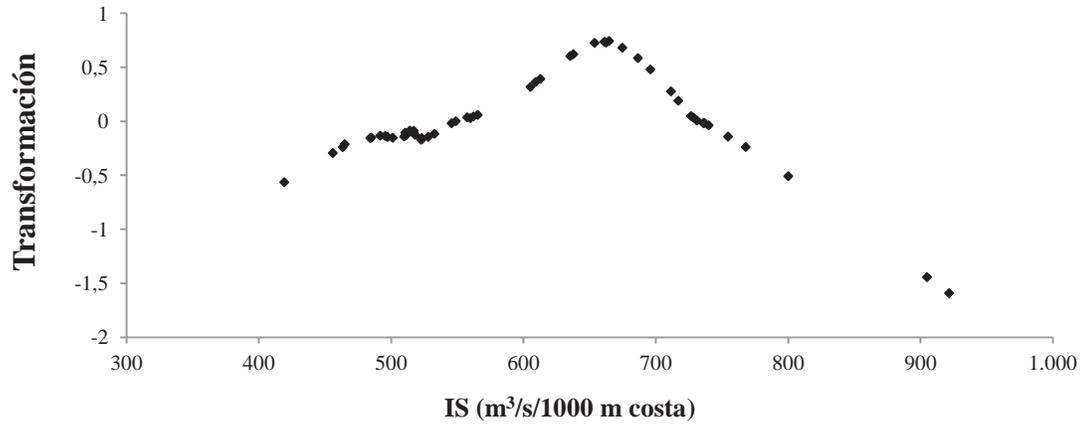
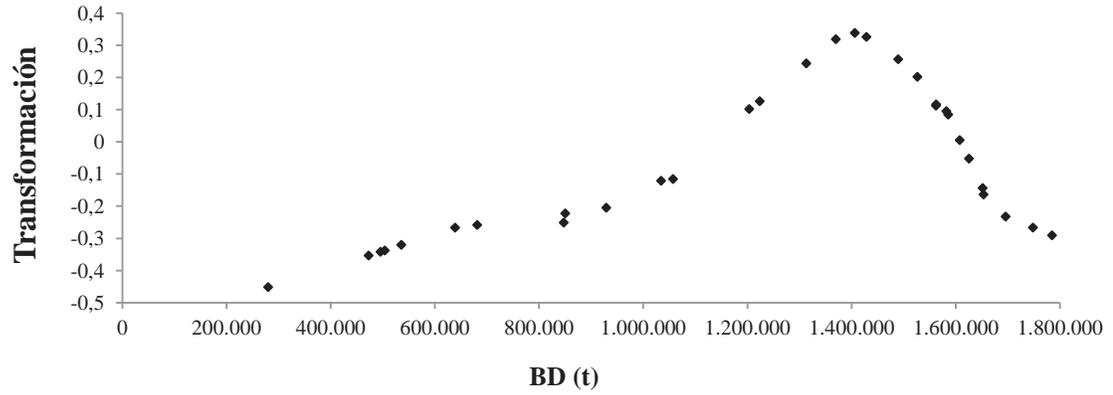
### 5.3.1 Modelo 1

Este modelo explica la relación entre el R y las variables independientes BD e IS. Según la Tabla 6, el modelo obtenido presenta niveles de correlación bajos en comparación con los modelos 3 y 4. El algoritmo AVAS explica solo un 58 % de la varianza observada, mientras que ACE en un 64%. Ésta diferencia es explicada por la heterocedasticidad que presentan los datos y que corrige AVAS (error presente en el resto de los modelos). Con respecto al algoritmo GAM se utilizó el suavizador de dispersión spline por la semi-curva que muestran las transformaciones estimadas de los datos (Fig. 21), logrando explicar un 63% de la relación, con un nivel de significancia aceptable ( $p = 0,023$ ).

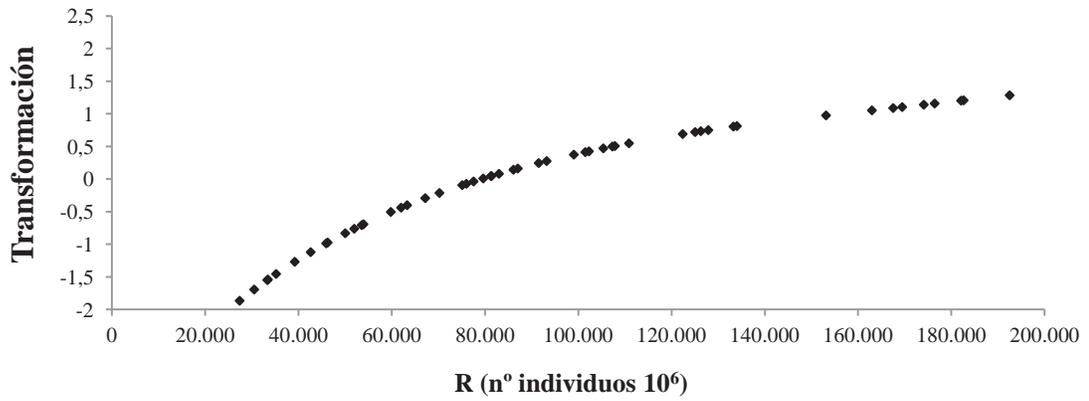
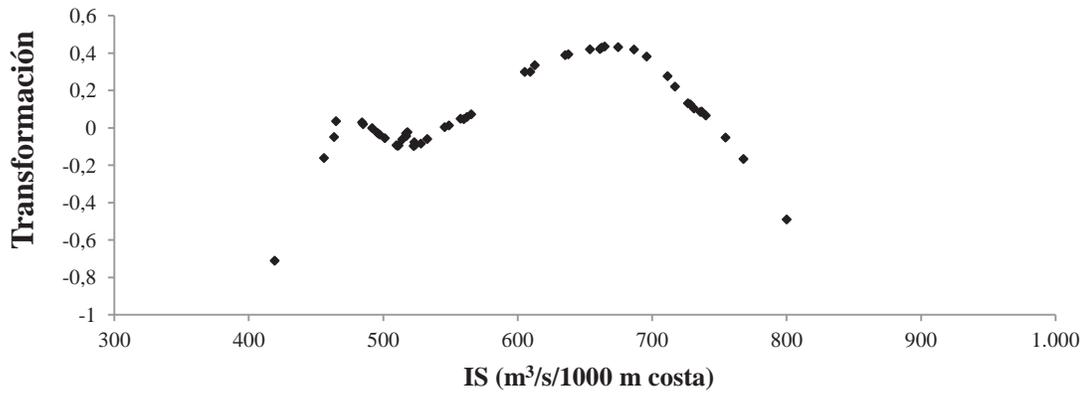
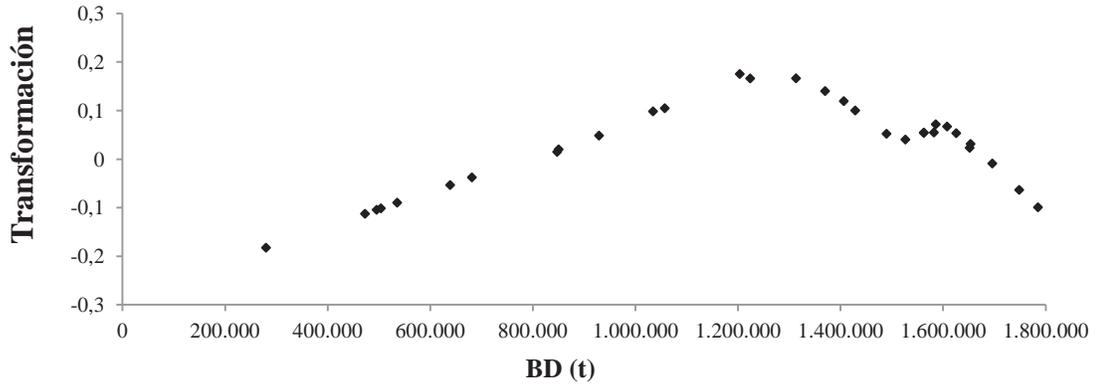
Para la BD las transformaciones óptimas encontradas con ACE y AVAS (Figs. 19 y 20), muestran una tendencia similar al modelo de Ricker (1954), es decir presenta un comportamiento creciente en la primera etapa hasta llegar a un punto de inflexión en los 1,3–1,4 millones de toneladas aproximadamente, para luego decaer.

Las transformaciones óptimas obtenidas con el algoritmo ACE para el IS, muestra un punto máximo en los 661 m<sup>3</sup>/s/1000 m costa, lo que corresponde a una velocidad del viento de 5,4 m/s (Fig. 19). Por otro lado, la figura 20 obtenida con AVAS muestra dos máximos, el primero en el intervalo 613 a 668 m<sup>3</sup>/s/1000 m costa (5,25 – 5,43 m/s) y otro máximo, de menor grado, en 485 m<sup>3</sup>/s/1000 m costa, que corresponde a 4,84 m/s. El algoritmo GAM para la transformación del IS muestra un máximo en 615 m<sup>3</sup>/s/1000 m costa, lo que corresponde a una velocidad del viento de 5,26 m/s, este valor representa un punto de inflexión en el que para velocidades menores tienen un comportamiento creciente, mientras que para velocidades mayores el comportamiento es decreciente (domo), tal como se muestra en la figura 21.

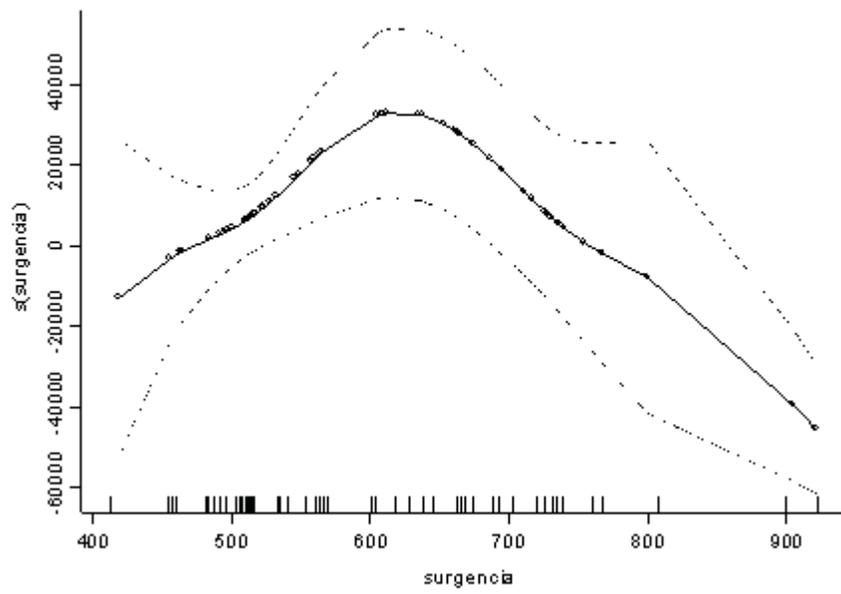
La transformación para el R estimada por el algoritmo ACE muestra un comportamiento variable con dos máximos, el primero en 101,5 mil millones de individuos y el otro en 170 mil millones de individuos (Fig. 19). Con el algoritmo AVAS la curva se asemeja al modelo clásico stock-recluta de Beverton & Holt (1957), donde a partir de los 160 mil millones de individuos la curva se estabiliza (Fig. 20).



**Figura 19.** Transformaciones óptimas ACE para BD, IS y R, modelo 1.



**Figura 20.** Transformaciones óptimas AVAS para BD, IS y R, modelo 1.



**Figura 21.** Transformación óptima GAM para IS, modelo 1.

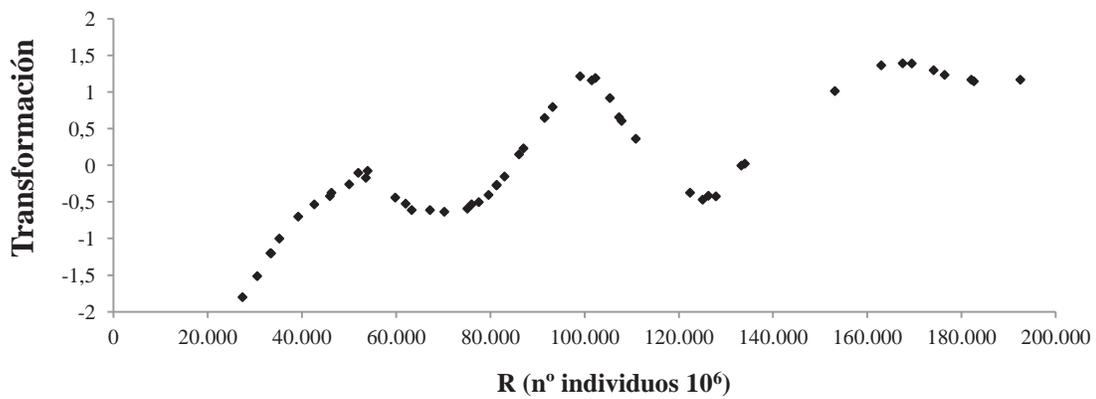
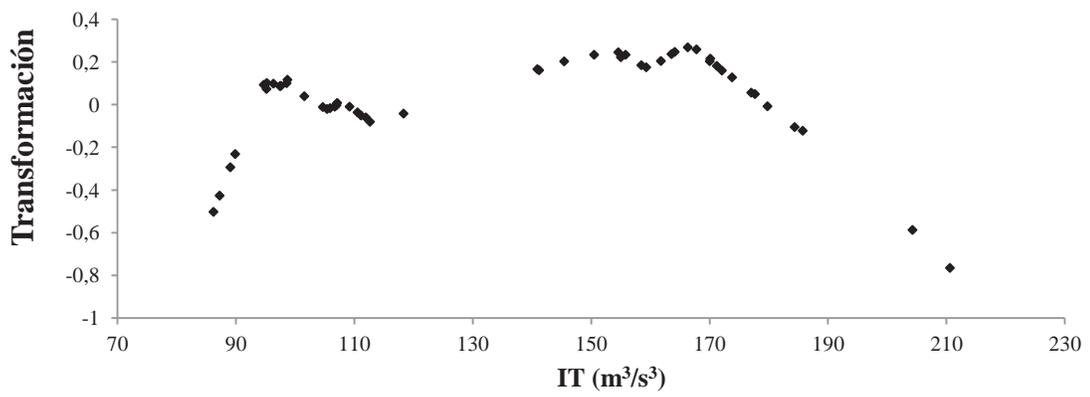
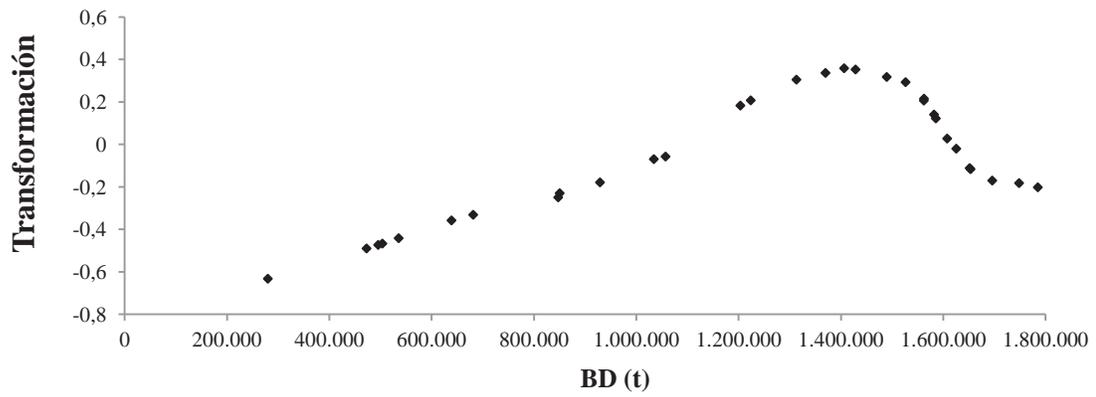
### 5.3.2 Modelo 2

Este modelo explica la relación entre el R y las variables independientes BD e IT. Como muestra la Tabla 6, el modelo obtenido presenta los niveles de correlación más bajos, explicando según el algoritmo ACE una relación sólo del 57%, mientras que AVAS, sólo alcanza un 52%. Para el algoritmo GAM se utilizó un suavizador de dispersión spline para el IT, logrando explicar un 53% de la relación, con un nivel de significancia aceptable ( $p = 0,007$ ), tal como se muestra en la figura 24.

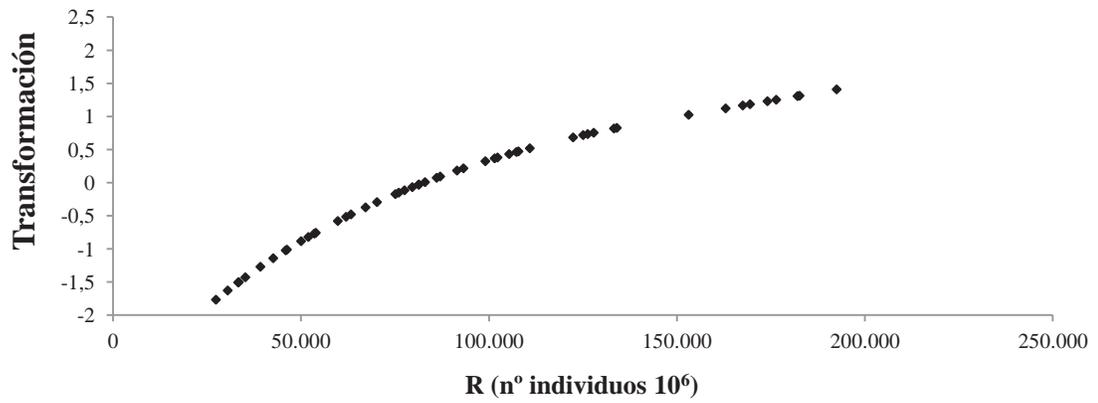
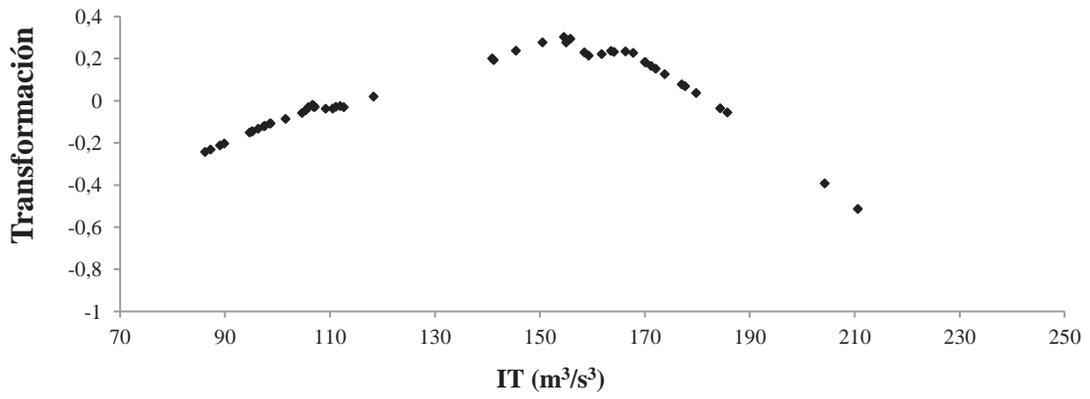
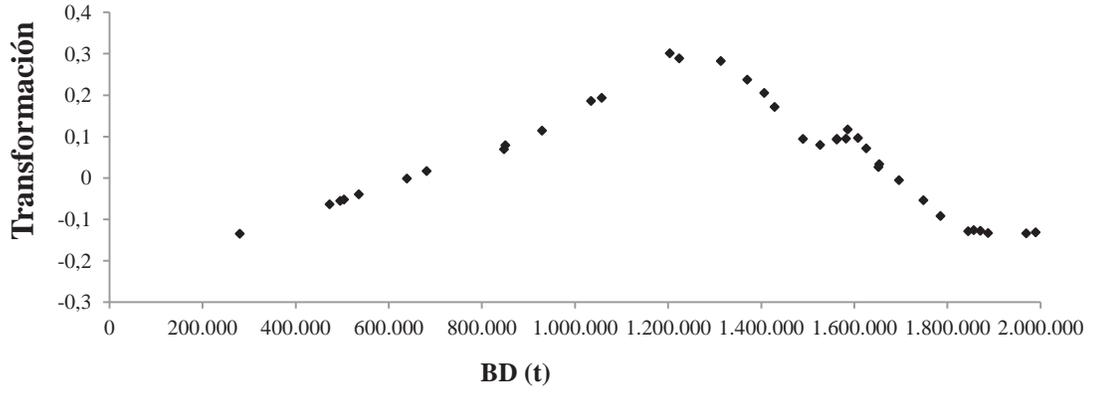
Las transformaciones óptimas para la BD obtenidas con ACE y AVAS, muestran una curva similar al modelo clásico de Ricker (1954), donde la curva tiene un comportamiento creciente hasta los 1,4 millones de toneladas para el algoritmo ACE, mientras que para AVAS ocurre en 1,2 millones de toneladas, posterior a estos puntos, las curvas muestran un comportamiento decreciente (Figs. 22 y 23).

La transformación ACE para el IT muestra que si bien existen valores máximos dentro de la curva, estos pertenecen a un intervalo de valores máximos, que van desde los 97 ( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ) que corresponde a una velocidad del viento de 4,59 m/s, hasta los 166 ( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ) que corresponde a 5,49 m/s. Además, se observa que para valores de IT menores a 90 ( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ) ó mayores a 170 ( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ), presentan características ambientales desfavorables para el R de la anchoveta (Fig. 22). Con AVAS se destaca un valor máximo de 155 ( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ) que corresponde a una velocidad del viento 5,37 m/s (Fig. 23). La transformación para el IT determinada mediante GAM, muestra un máximo primario en 150  $\text{m}^3/\text{s}^3$  y uno secundario en 100  $\text{m}^3/\text{s}^3$  que corresponde a una velocidad del viento de 5,31 y 4,64 m/s, respectivamente (Fig. 24).

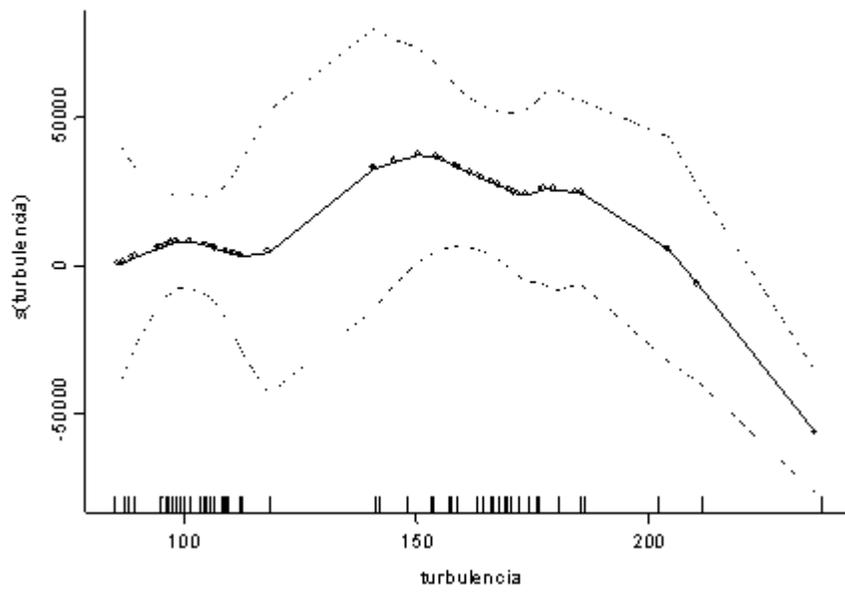
La transformación estimada para el R tiene un comportamiento creciente en AVAS similar al modelo clásico stock-recluta de Beverton & Holt (1957), mientras que la curva obtenida con ACE no muestra una tendencia específica (Figs. 22 y 23).



**Figura 22.** Transformaciones óptimas ACE para BD, IT y R, modelo 2.



**Figura 23.** Transformaciones óptimas AVAS para BD, IT y R, modelo 2.



**Figura 24.** Transformación óptima GAM para IT, modelo 2.

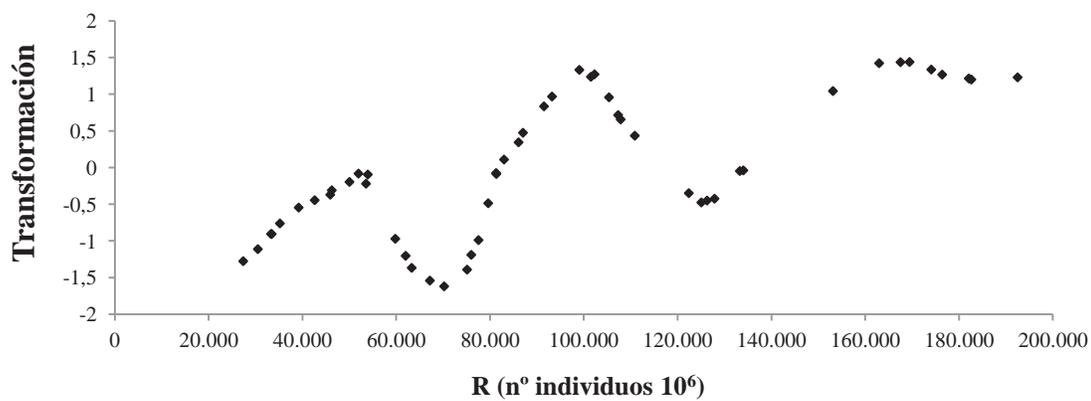
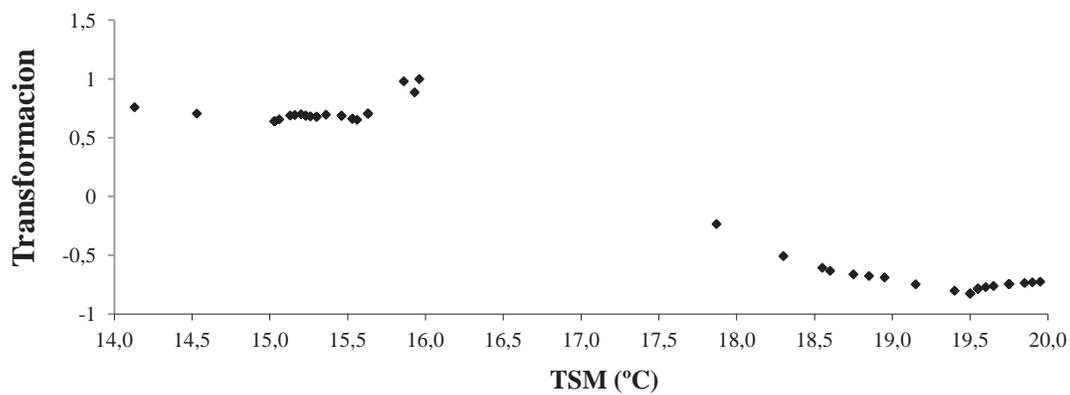
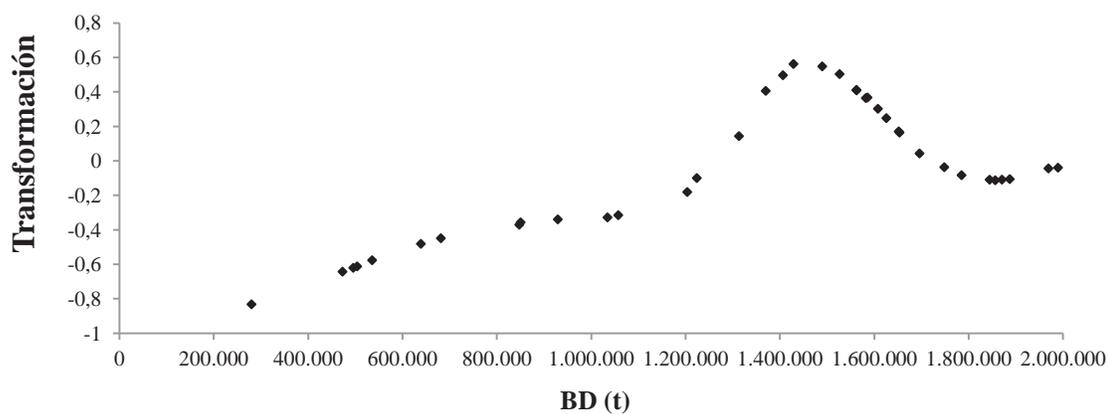
### 5.3.3 Modelo 3

Este modelo explica la relación entre el R y las variables independientes BD y TSM. Como muestra la Tabla 6, el modelo obtenido presenta los niveles de correlación más altos y un nivel de significancia aceptable entregado por GAM ( $s(BD)=0,014$  y  $s(TSM)=0,002$ ). Se aplicó el suavizador de dispersión spline, tanto para la BD como para la TSM, de esta forma el algoritmo GAM entrega un nivel de significancia para cada variable y una correlación de 82%. Para ACE y AVAS se obtiene una correlación de 86% y 80%, respectivamente.

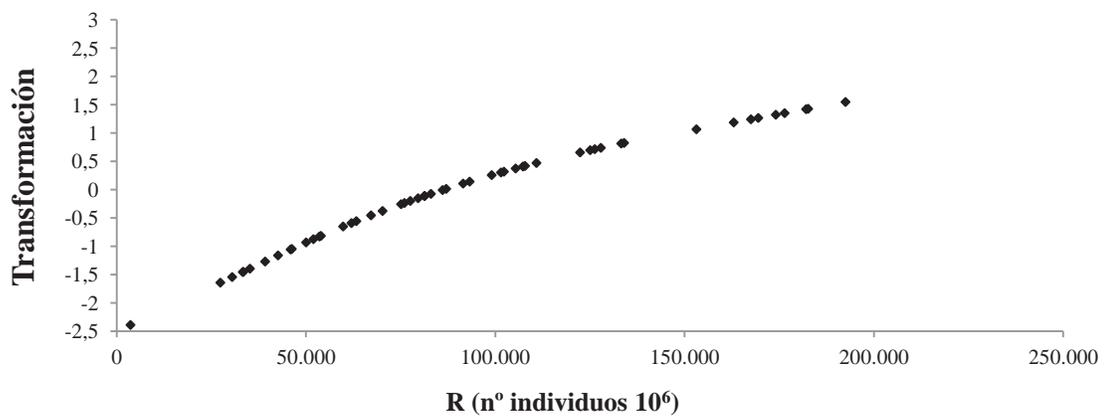
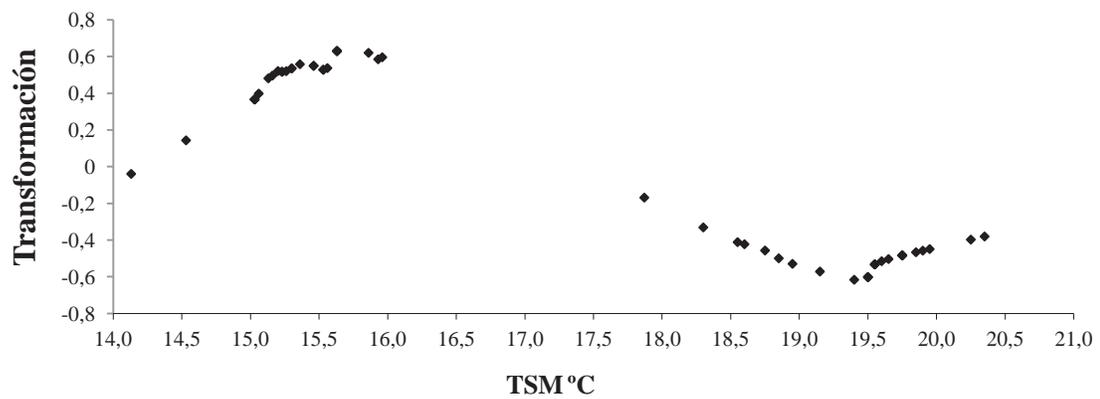
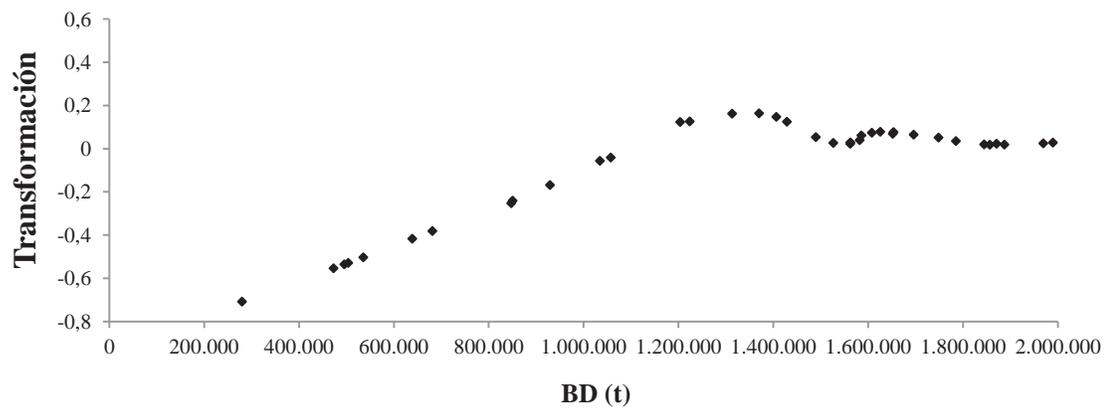
En particular, la BD presenta una curva similar al modelo clásico de Ricker (1954) donde el algoritmo ACE muestra que luego de una primera fase creciente se presenta un punto de inflexión en 1,4 millones de toneladas para luego decrecer (Fig. 25). El algoritmo AVAS sigue la tendencia descrita por Beverton & Holt (1957), con una primera fase creciente hasta un punto de inflexión en 1,3 millones de toneladas y para luego estabilizarse en 1,5 millones de toneladas (Fig. 26). El comportamiento de la BD bajo el algoritmo GAM, es presentado en la figura 27, el cual es muy similar en estructura al modelo stock-recluta de Ricker (1954), donde presenta un comportamiento creciente hasta 1,3 millones de toneladas para luego decrecer.

Las curvas para la TSM entregadas por los algoritmos ACE y AVAS presentan similares características al modelo anterior debido a que ambos muestran un máximo en 16 °C, asociado posiblemente a valores presentes en el primer semestre explicados por el desove primario. Se destaca que ambos algoritmos muestran una fuerte caída para valores superiores a los 16 °C (Figs. 25 y 26). En las figuras citadas, se observa la ausencia de valores para la transformación de la TSM en el intervalo 16-17,5°C. El comportamiento de la TSM según el algoritmo GAM muestra un máximo en los 16°C (Fig. 27).

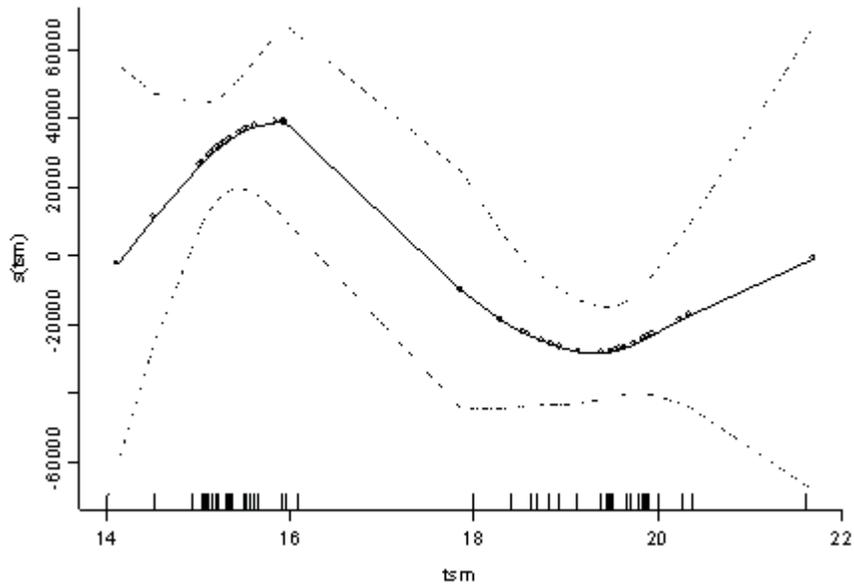
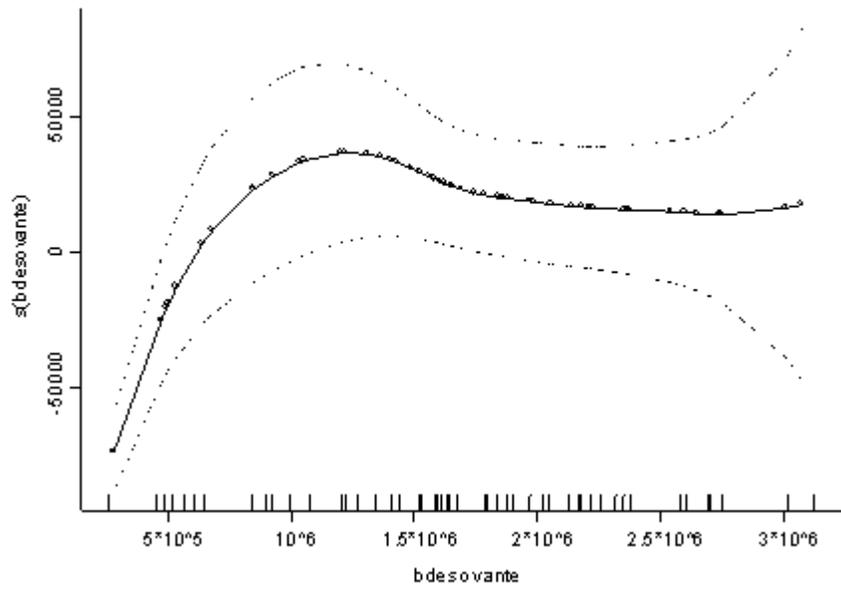
El R sigue la tendencia de los modelos anteriores, con ACE no sigue una tendencia clara, y presenta tres máximos alrededor de los 50, 100 y 160 mil millones de individuos (Fig. 25). Con AVAS presenta una tendencia creciente lineal (Fig. 26).



**Figura 25.** Transformaciones óptimas ACE para BD, TSM y R, modelo 3.



**Figura 26.** Transformaciones óptimas AVAS para BD, TSM y R, modelo 3.



**Figura 27.** Transformación óptima GAM para BD y TSM, modelo 3.

### 5.3.4 Modelo 4

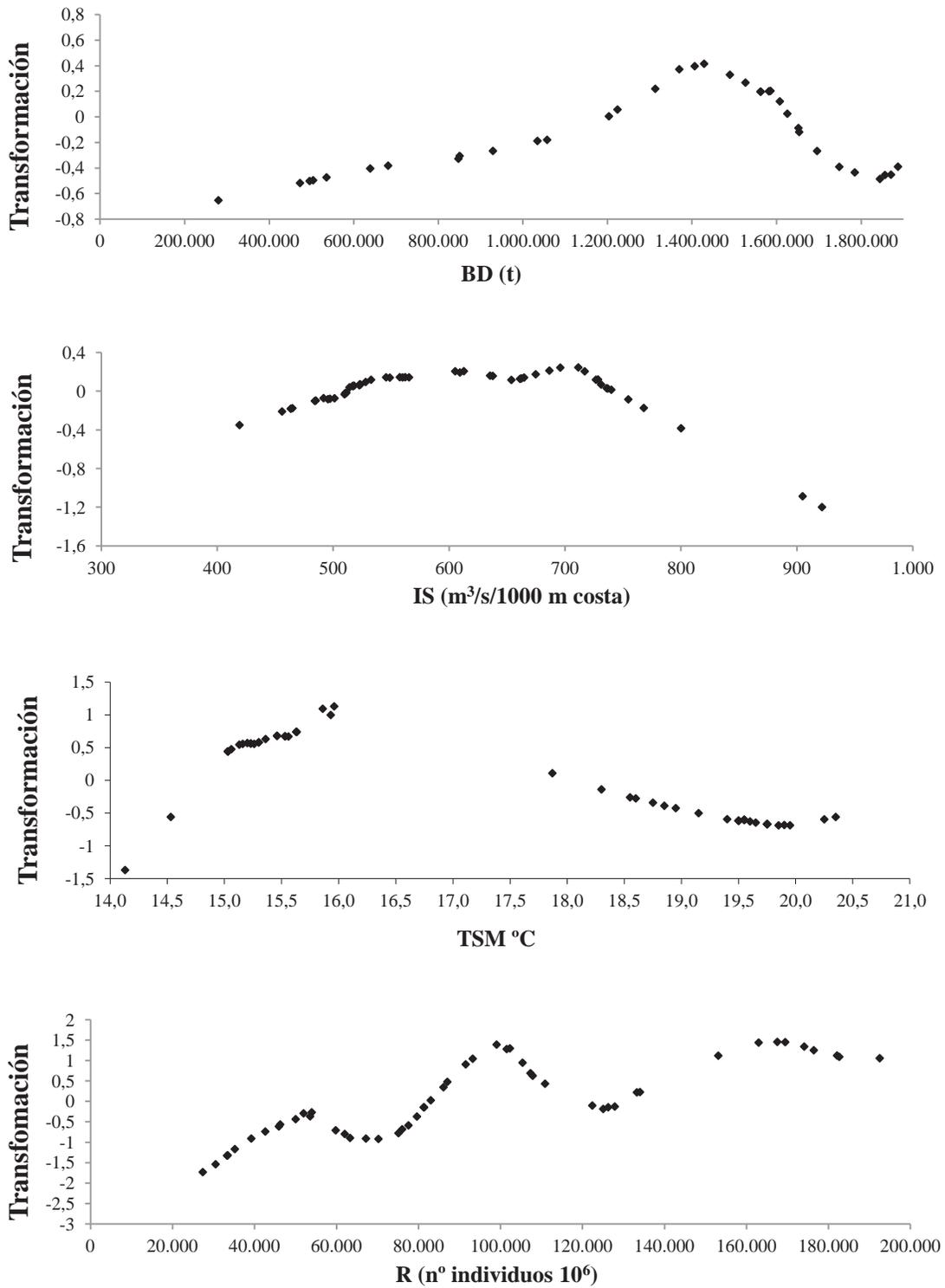
Este modelo explica la relación entre el R y las variables independientes BD, IS y TSM. Según la Tabla 6, el modelo obtenido con el algoritmo AVAS presenta un coeficiente de correlación de 59%, mientras que ACE un 80%, nuevamente esta diferencia es explicada por la heterocedasticidad que corrige AVAS. Con respecto al algoritmo GAM se utilizó el suavizador de dispersión spline, logrando explicar un 69% de la relación con un nivel de significancia aceptable ( $s(\text{IS})=0,009$  y  $s(\text{TSM})=0,002$ ).

La transformación para la BD obtenida con el algoritmo ACE, presenta una forma similar al modelo de Ricker (1954), con un punto de inflexión en 1,4 millones de toneladas para luego decrecer (Fig. 28). El algoritmo AVAS sigue la tendencia con un máximo en 1,6 millones de toneladas (Fig. 29).

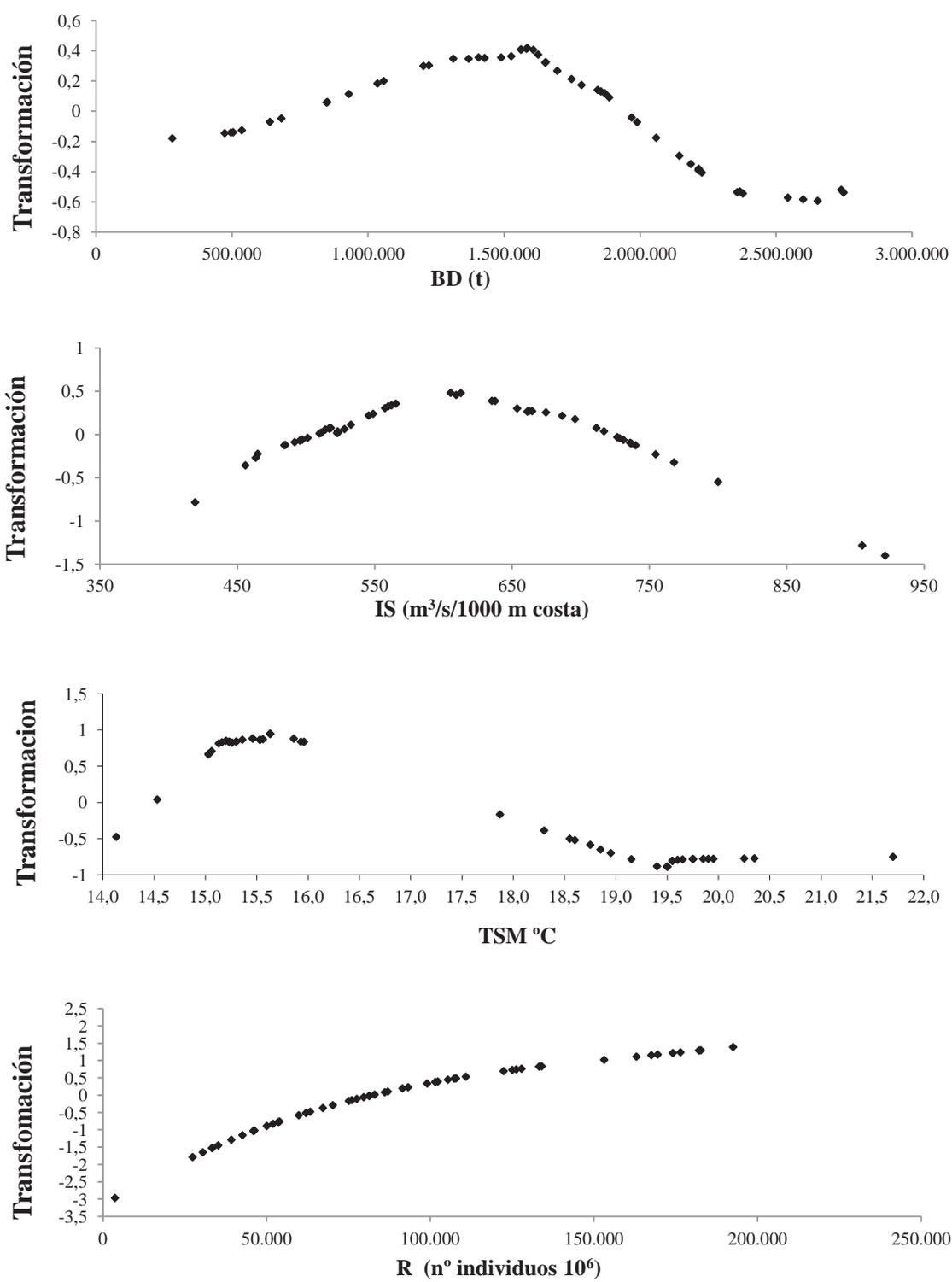
Para la transformación del IS con ACE se observa un máximo en  $711 \text{ m}^3/\text{s}/1000 \text{ m}$  costa, que corresponde a una velocidad del viento de 5,56 m/s. Además, se observa que para valores menores a  $546 \text{ m}^3/\text{s}/1000 \text{ m}$  costa (4,72 m/s) y valores mayores a  $711 \text{ m}^3/\text{s}/1000 \text{ m}$  costa, el IS es desfavorable para esta especie (Fig. 28). Para el algoritmo AVAS se observa un punto óptimo en  $605 \text{ m}^3/\text{s}/1000 \text{ m}$  costa que corresponde a 5,22 m/s (Fig. 29). La transformación GAM para el IS presenta un máximo en los  $630 \text{ m}^3/\text{s}/1000 \text{ m}$  costa, lo que corresponde a una velocidad del viento de 5,3 m/s (Fig. 30).

Las transformaciones obtenidas para la TSM efectuadas con el algoritmo ACE, muestran un comportamiento similar al modelo 3, donde se obtiene un máximo en  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  y para valores superiores una curva decreciente (Fig. 28). Con el algoritmo AVAS se observan valores máximos en el intervalos de 15 a  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , pero se destaca que en valores menores a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , la TSM muestra valores desfavorables para el R de la especie (Fig. 29). Para el algoritmo GAM, el comportamiento es similar al obtenido con ACE (Fig. 30).

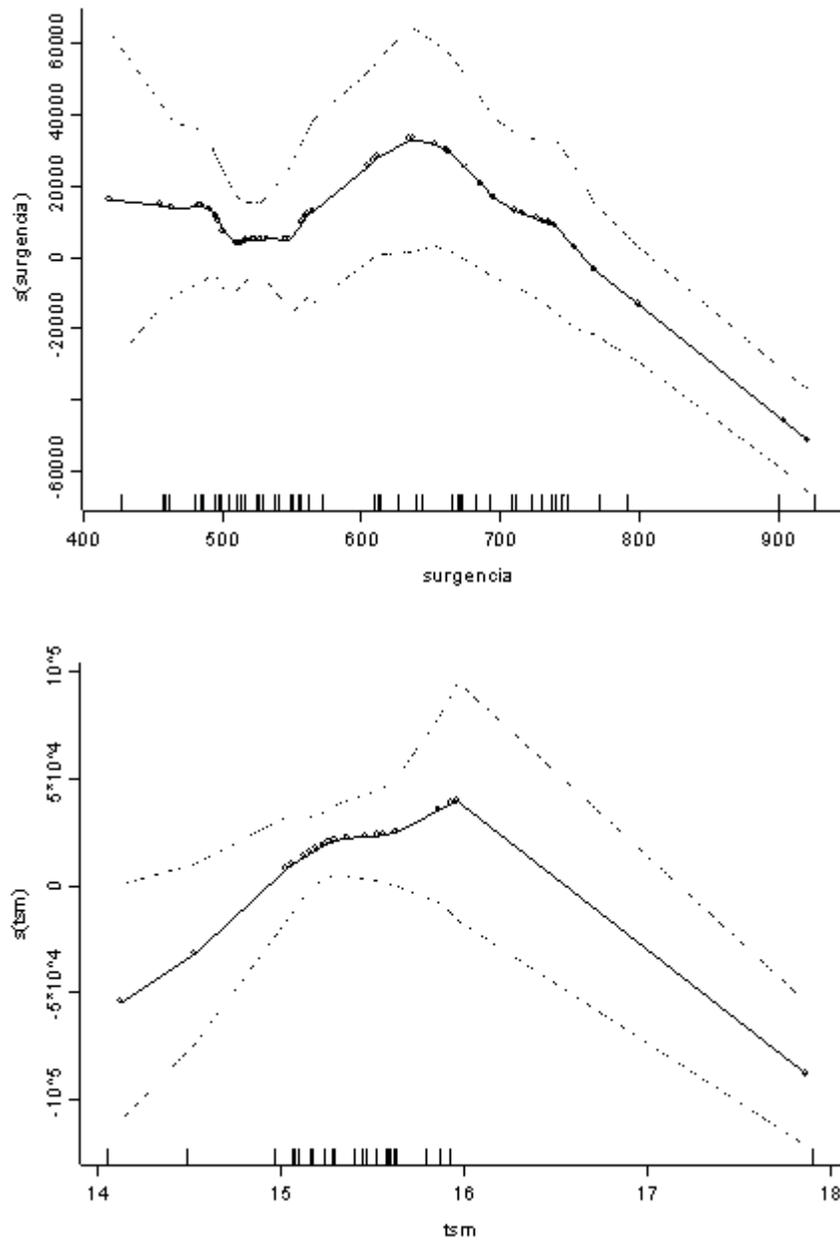
La transformación estimada para el R por el algoritmo ACE no se asemeja a ningún modelo clásico de stock, pero muestra dos máximos en 100 y 160 mil millones de individuos y un máximo secundario en 50 mil millones de individuos (Fig. 28). Para el caso de la transformación del R con el algoritmo AVAS, se mantiene la tendencia de los modelos anteriores con un comportamiento lineal creciente. Cabe señalar que la transformación del modelo AVAS presenta gran similitud con el modelo clásico stock-recluta de Beverton & Holt (1957) (Fig. 29).



**Figura 28.** Transformaciones óptimas ACE para BD, IS, TSM y R, modelo 4.



**Figura 29.** Transformaciones óptimas AVAS para BD, IS, TSM y R, modelo 4.



**Figura 30.** Transformación óptima GAM para IS y TSM, modelo 4.

### 5.3.5 Modelo 5

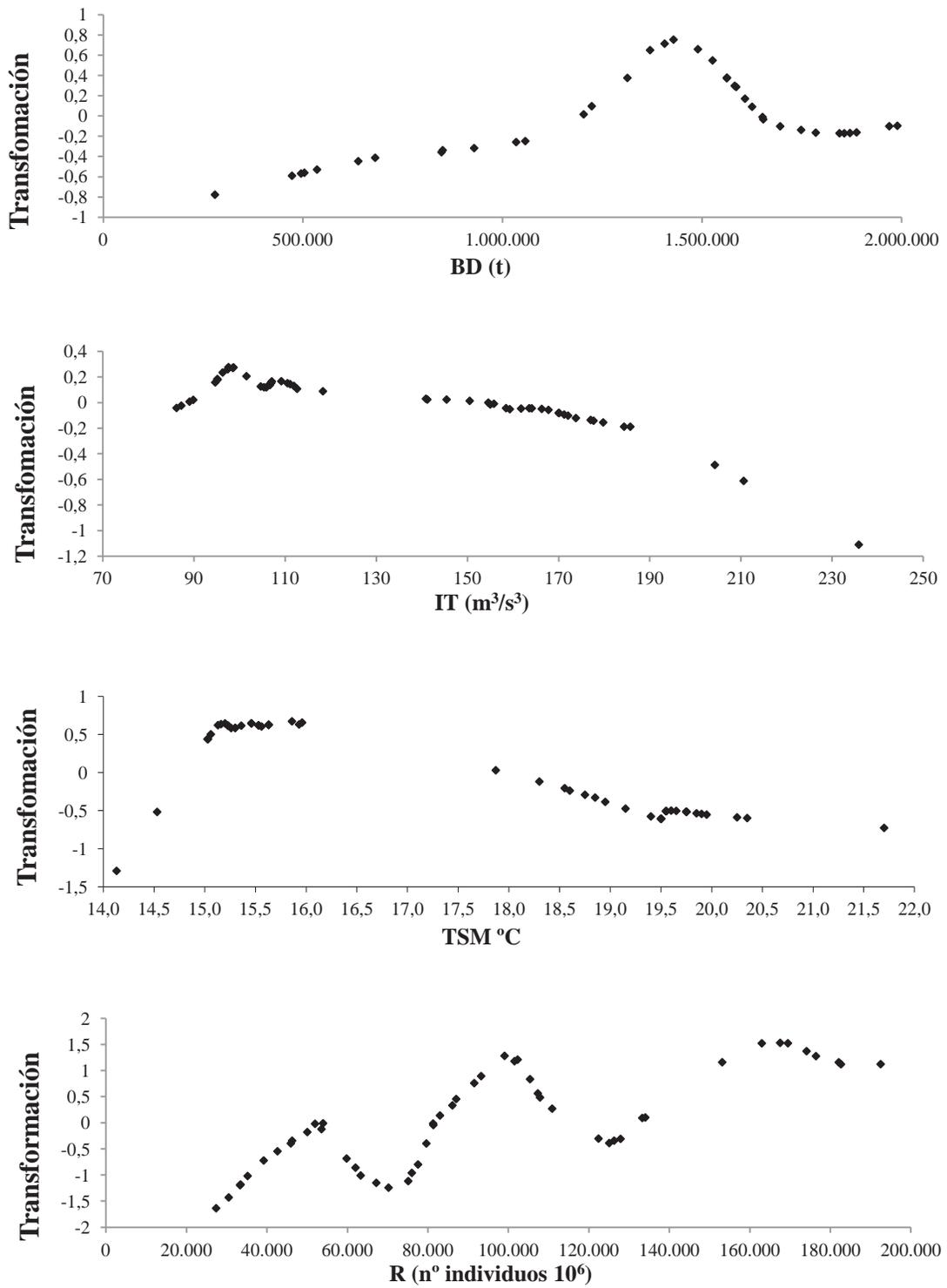
Este modelo explica la relación entre el R y las variables independientes BD, IT y TSM. Según la Tabla 6, el modelo obtenido con el algoritmo ACE explica un 80% de la varianza observada, mientras que AVAS sólo el 52%. Con respecto al algoritmo GAM se utilizó el suavizador de dispersión loess para la TSM, logrando explicar un 58% de la varianza observada con un nivel de significancia aceptable ( $p = 0,040$ ).

La transformación para la BD con el algoritmo ACE presenta una forma similar al modelo de Ricker (1954), con un punto de inflexión en 1,4 millones de toneladas para luego decrecer (Fig. 31). El algoritmo AVAS sigue la tendencia con un máximo en 1,4 millones de toneladas (Fig. 32).

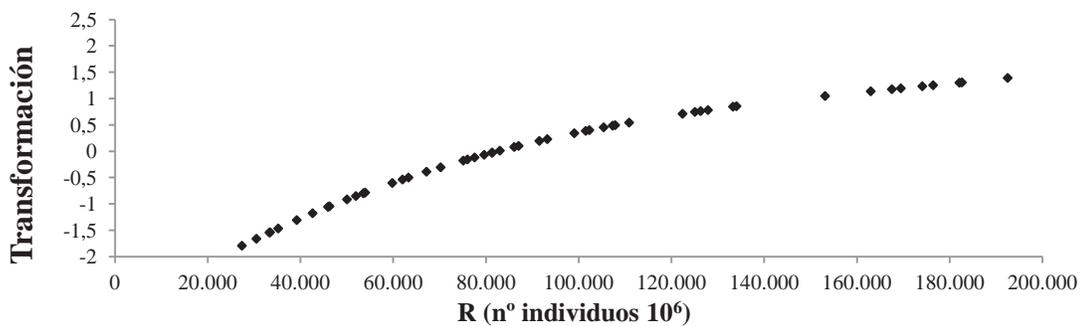
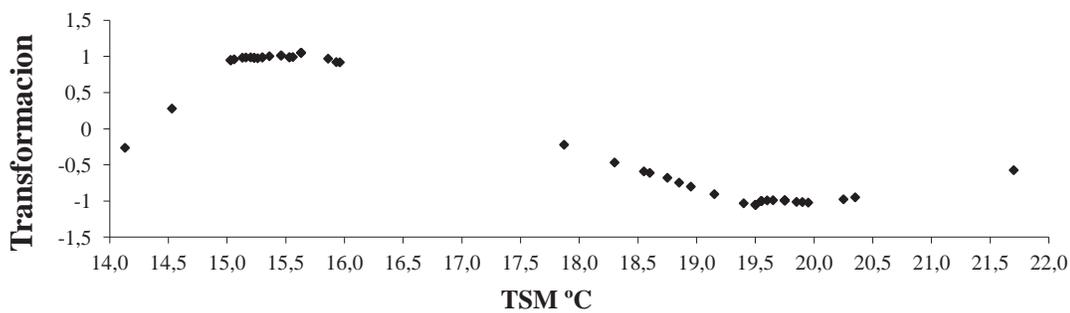
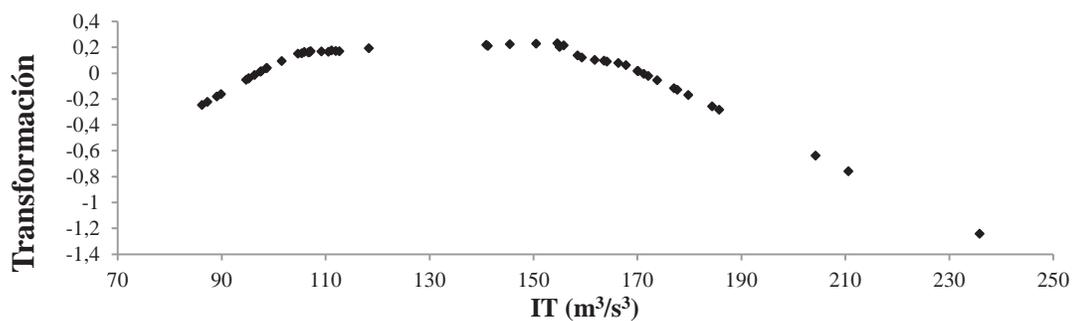
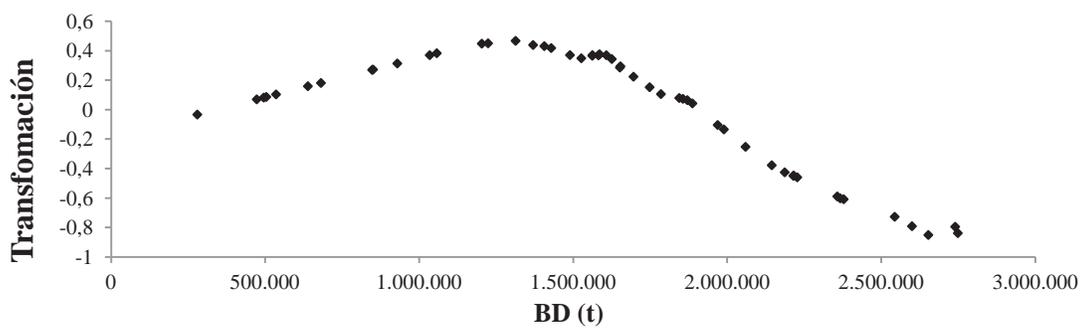
Para la variable IT, la transformación con el algoritmo ACE presenta un máximo en  $97 \text{ m}^3/\text{s}^3$  (velocidad del viento de 4,59 m/s), posteriormente continua con una leve tendencia a la baja hasta los  $190 \text{ m}^3/\text{s}^3$  (velocidad del viento 5,75 m/s) donde el IT decae abruptamente (Fig. 31). Para el caso de la transformación de la variable con el algoritmo AVAS, la curva toma una forma ascendente hasta que forma un pequeño domo entre los  $110 \text{ (m}^3/\text{s}^3)$  y  $160 \text{ (m}^3/\text{s}^3)$  que corresponden a una velocidad del viento de 4,79 y 5,43 m/s, respectivamente (Fig. 32).

Las transformaciones obtenidas para la TSM son similares a los modelos anteriores, donde el algoritmo ACE muestra un máximo entre 15 y 16 °C al igual que AVAS y para valores tanto mayores como menores la curva decae abruptamente (Figs. 31 y 32). El comportamiento observado para esta transformación mediante el algoritmo GAM, muestra un máximo en los 16°C (Fig. 33).

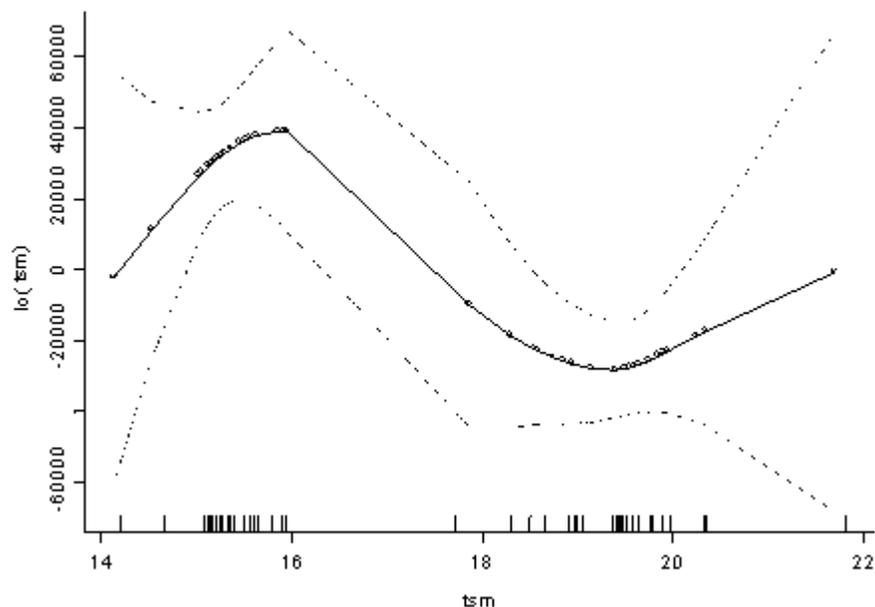
La transformación estimada para el R por el algoritmo ACE y AVAS se asemejan al modelo 4, donde en ACE se observan dos máximos uno en 100 y otro en 160 mil millones de individuos y un máximo secundario en 50 mil millones de individuos (Fig. 31). Para el caso de la transformación del R con el algoritmo AVAS se mantiene la tendencia de un comportamiento lineal creciente con gran similitud al modelo clásico stock – recluta de Beverton & Holt (1957) (Fig. 32).



**Figura 31.** Transformaciones óptimas ACE para la BD, IT, TSM y R, modelo 5.



**Figura 32.** Transformaciones óptimas AVAS para la BD, IT, TSM y R, modelo 5.



**Figura 33.** Transformación óptima GAM para TSM, modelo 5.

### 5.3.6 Ventana Ambiental Óptima

Todos los modelos expuestos anteriormente cumplen con los requisitos estadísticos del nivel de significancia ( $p \leq 0,05$ ), se opta por el modelo 1 que considera las variables BD e IS como una buena relación para explicar el R. La razón de esta elección se basa en la correlación existente entre las variables explicatorias y la respuesta. Si bien existen dos modelos (3 y 4) con buenas correlaciones (82% y 69% respectivamente), estos no son capaces de explicar el comportamiento global de la transformación de la TSM ya que no existen datos observados en el intervalo 16,1-17,8 °C. Esto debido a que los algoritmos utilizados en el análisis resultan en una transformación de la TSM, por tanto si no existen datos de la TSM la transformación en dicho intervalo no es posible y por tanto no se puede establecer el comportamiento real de la tendencia de la curva.

De esta forma, la elección del modelo explicatorio se basa en que, tanto para los algoritmos ACE, AVAS y GAM, se tienen las mayores correlaciones entre la variable respuesta (R) y las variables explicatorias, BD e IS, no incluyendo aquellos modelos que contienen a la variable TSM. El modelo GAM considera un porcentaje explicativo de un 63% y un nivel de significancia estadístico para el IS de  $p \leq 0,023$ . Cabe mencionar que este modelo cumple con los supuestos de normalidad, diagnóstico de residuos y homogeneidad de la varianza (Anexo II).

El IS analizado con el algoritmo GAM, se presenta en la figura 21. En ésta se observa un máximo en la curva de  $615 \text{ m}^3/\text{s}/1000 \text{ m}$  costa, lo que corresponde a una velocidad del viento de  $5,26 \text{ m/s}$ . El comportamiento de la transformación del IS es en forma de domo. Por tanto, se establece una ventana ambiental óptima para el recurso anchoveta en el stock sur de Perú y norte de Chile, con valor óptimo del IS en los  $5,26 \text{ m/s}$ , donde para cualquier incremento o decaimiento, el R será desfavorable para este recurso.

## 6. DISCUSIONES

Los mecanismos que controlan el éxito del R son complejos y difíciles de conocer e interpretar. Como se ha señalado, dependen de los procesos físicos y biológicos que a menudo pueden ejercer efectos no deseados sobre la producción de larvas, crecimiento y la supervivencia en el ecosistema pelágico.

Estudios que buscan asociaciones entre el R y las variables independientes considerando un período de análisis de un año, no revelarían la naturaleza subyacente de los mecanismos que influyen en el comportamiento biológico-pesquero del recurso. Dentro de este contexto Cerna *et al.* (2011) realizan una asignación por grupo de edad de anchoveta de la zona norte de Chile, a través de la microestructura de otolitos de *Engraulis ringens*, demostrando que esta especie alcanza los 12 cm de longitud total en aproximadamente 4 meses de vida debido a un elevado crecimiento en la etapa larval y juvenil temprana, mayor que el estimado en otros *Engraulidos* (Hunter, 1976; Methot, 1983; Butler, 1989; Cermeño *et al.*, 2008; Mitai, 1990; Takahashi *et al.*, 2001; Takahashi & Watanabe, 2004). Un estudio reciente, realizado para *Engraulis encrasicolus* (Aldanondo *et al.*, 2011) revelaría tasas similares a las reportadas por Cerna *et al.* (2011) por lo tanto, aparentemente el R es entre 3-4 meses de vida en forma consistente durante prácticamente todo un ciclo anual, proveyendo de múltiples cohortes para sostener un R permanente de esta especie en la zona norte de Chile. Por consiguiente, el presente estudio enfoca sus esfuerzos en el análisis semestral del R y su relación con la BD y variables ambientales (IS, IT y TSM) a la luz de un conocimiento a priori sobre sus posibles relaciones.

- *Índice de surgencia (IS)*

Los modelos 1 y 4 incluyen el IS para establecer posibles relaciones entre el R y dicha variable. De estos la mayor correlación se observa para el modelo 1, mostrando una curva de comportamiento en forma de domo con un máximo en una velocidad del viento de 5,26 m/s (Fig. 21). Este resultado se asemeja a lo obtenido por Opazo (2003), donde considera el promedio del IS de los periodos de reproducción (julio – septiembre y diciembre - enero) de la anchoveta en la zona norte de Chile, utilizando el modelo  $R = BP + s(IS)$  el cual es significativo ( $p = 0,006$ ) y explica el 86% de la varianza, donde la curva presenta la forma de domo con un punto de inflexión en una velocidad del viento de 5,6 m/s. En tanto Yáñez *et al.* (2003) considera un modelo donde el R de la anchoveta es explicado sólo por el IS, en el periodo de desove principal (julio - septiembre). El modelo muestra una curva en forma de domo con una inflexión en una velocidad del viento de 5,41 m/s, el cual explica el 61% de la varianza y con  $p = 0,047$ . Cabe notar que los valores obtenidos en este estudio difieren de los expuestos por Opazo (2003), en un 6% considerando el mismo modelo explicatorio pero bajo un periodo de análisis distinto (anual

v/s semestral). En relación a Yáñez *et al.* (2003), la variación porcentual es del 3% para la velocidad del viento determinada en este estudio, para un modelo explicatorio y un periodo de análisis distinto.

Según Cury & Roy (1989), la ventana ambiental óptima en sistemas de surgencia que favorece el éxito del reclutamiento es caracterizada por una estrecha banda de velocidades del viento ubicada entre los 5-6 m/s. En particular, los resultados obtenidos en este estudio son consistentes ya que pertenecen al intervalo definido por Cury & Roy (1989) y porcentualmente las diferencias con los estudios de Opazo (2003) y Yáñez *et al.* (2003), no resultan significativas. De esta forma, se plantea la existencia de una ventana ambiental óptima, donde el éxito en el R estaría determinado por la relación existente entre la BD y el IS.

- *Índice de turbulencia (IT)*

Al analizar los modelos que incluyen el IT (modelo 2 y 5) para la anchoveta en el stock sur del Perú y norte de Chile, se destaca la forma de la curva del modelo 2 (Fig. 23) donde se observa un domo para una velocidad del viento de 5,37 m/s y para valores superiores, una pendiente negativa. Al hacer una comparación en el contexto de la hipótesis de la ventana ambiental óptima, Yáñez *et al.* (2001) analiza la variabilidad del R anual (i) de la anchoveta en la zona norte de Chile en función de la BD y el IT, concluyendo que el R se relaciona en forma no lineal con el IT (promedio del año), logrando un óptimo para una velocidad del viento de 5,46 m/s ( $R^2 = 0,75$ ). Estos resultados son similares en la forma (domo o cúpula) con el estudio presentado, no así respecto al periodo de tiempo considerado para el R. Ahora bien, el modelo presentado concuerda en forma y valor con el realizado por Cury & Roy (1989), donde la transformación del IT presenta una curva en forma de domo, con una velocidad del viento máxima de 5-6 m/s, para luego disminuir bruscamente.

Yáñez *et al.* (2001), indica en el caso de la sardina (*Sardinops sagax*), que el IT (promedio del año i al i-3) alcanza un punto máximo en los  $176 \text{ m}^3/\text{s}^3$  ( $R^2 = 0,86$ ) que corresponde a una velocidad del viento equivalente a 5,61 m/s, y a diferencia de la anchoveta la curva no tiene la forma de domo sino que luego de alcanzar el máximo la curva alcanza una estabilización para valores mayores. De esta forma, mientras la anchoveta comienza a disminuir notablemente el R a partir de 5,41 m/s, la sardina los sigue aumentando hasta estabilizarse en los niveles más altos de IT.

Olmos (2005) estudió el jurel (*Trachurus murphyi*) en la zona centro –sur de Chile, encontrando una curva similar a la planteada por Yáñez *et al.* (2001) para la sardina, donde la curva alcanza un máximo en  $950 \text{ m}^3/\text{s}^3$  (velocidad del viento de 9,8 m/s) y luego

estabilizarse. Cabe señalar que el jurel a diferencia de la anchoveta presenta una estrategia reproductiva oceánica en aguas oligotróficas, para evitar el riesgo de predación de huevos y disminuir la competencia por el alimento en estadios larvales (Gatica *et al.*, 2003). Este valor es muy alto en comparación con los obtenidos por Sepúlveda *et al.* (2002) y Arcos *et al.* (2005) que coinciden en valores cercanos a  $200 \text{ m}^3/\text{s}^3$  para la misma especie y lugar. Según Olmos (2005), esta diferencia radica principalmente por la procedencia de los datos, ya que en su estudio utilizó información proveniente de la estación costera de Talcahuano cuyos valores son tomados en zonas cercanas a la costa donde la surgencia es alta en comparación a las áreas de desove que se encuentran en aguas oceánicas. En el caso de Sepúlveda *et al.* (2002) y Arcos *et al.* (2005), los datos fueron recolectados por medio de imágenes satelitales. Se deduce la importancia de obtener datos del ambiente donde ocurren procesos tan importantes como el desove y periodo de pre-recluta, puesto que entre más representativos sean, mejor será la modelación y el análisis descriptivo.

- *Relación índice de surgencia (IS) e índice de turbulencia (IT)*

Se determina la estrecha correlación existente entre el IS y el IT ( $R^2=0,84$ , Fig. 18) al igual que en las zonas de surgencia de Marruecos, Perú y Senegal (Cury & Roy, 1989). En efecto, ambos índices son calculados a partir del viento y en la zona norte de Chile los vientos predominantes del sur y sur-oeste son favorables a la surgencia y por ende al transporte hacia el oeste (Pizarro *et al.*, 1994). Esta misma evolución del IS ha sido observada en California, Península Ibérica, Marruecos, Perú y golfo de Guinea (Bakun, 1990, 1995). Bakun (1995) sugiere que la intensificación de la fuerza de los vientos sobre la superficie del mar a lo largo de las costas, conduciría a una acentuación de las surgencias, alterando las zonas de reproducción de especies pelágicas costeras tales como la anchoveta. En efecto, el aumento del IS provocaría una mayor advección de huevos y larvas lejos de la costa (fuera del área de crianza) aumentando la mortalidad de estos, afectando directamente al R; en tanto que el aumento del IT dificultaría las condiciones de alimentación de larvas, juveniles y adultos debido a una dispersión y modificación de la calidad del alimento (Bernal *et al.*, 1983, Santander & Flores, 1983; Cole & McGlade, 1998).

Yáñez *et al.* (2003), deduce que en valores cercanos a los 5,4 m/s de intensidad del viento, la magnitud de la turbulencia y el éxito de R serían óptimos para la anchoveta. Según Roy (1990), a partir de los 6 m/s la tensión del viento provoca una mezcla significativa en la columna de agua, implicando dispersiones en las concentraciones de plancton. A su vez, Roy *et al.* (1992) señala que la estrategia reproductiva de pequeños pelágicos en aquellas áreas donde la turbulencia es mayor que la ventana ambiental óptima durante la época de surgencia, el desove ocurre fuera de esta época o bien cuando las surgencias son menores, con el fin de disminuir los efectos negativos de las turbulencias intensas sobre la sobrevivencia de las larvas. Esto se explicaría por el dominio de la turbulencia sobre otros factores perjudiciales que limitan el período de desove. Según estos

autores, la estrategia reproductiva sería el resultado de la combinación entre varios factores ambientales, y correspondería a una respuesta evolutiva que ha adaptado la reproducción al ambiente, para maximizar el éxito del R.

- *Temperatura superficial del mar (TSM)*

La relación entre el R y la TSM se analiza en los modelos 3, 4 y 5. Estos modelos se descartan a la hora de evaluar la relación existente entre el R, la BD y las variables ambientales debido a la ausencia de datos observados de TSM en el intervalo 16,1-17,8 °C. Esta ausencia se explica al considerar un periodo de análisis semestral en base a lo expuesto en la sección 4.3, donde en el primer semestre (julio-septiembre) se registran TSM menores a 16,1°C para todos los años considerados en el estudio, de la misma forma para el segundo semestre (diciembre-enero), las TSM registradas son superiores a 17,8°C. En consecuencia, al no registrar datos de entrada para la TSM en dicho intervalo, las transformaciones de la variable en los modelos 3, 4 y 5, resultan nulos para ese rango de valores, haciendo imposible la interpolación del comportamiento del R.

En particular, el modelo 3 logra explicar un mayor porcentaje de la varianza observada en los datos del R (82%), y a la vez es estadísticamente significativo (BD:  $p \leq 0,014$  y TSM  $p \leq 0,002$ ), para el rango de valores observado de la TSM. La figura 27 muestra que el R se relaciona en forma no lineal con las variables independientes (BD, TSM) mostrando forma de domo con una máximo en 16°C. Esta curva es similar a lo establecido por Yáñez & Espindola (1998), donde explican la relación existente para la sardina en la zona norte de Chile, presentando una curva en forma de domo con un máximo situado en los 17,7°C y para valores inferiores los datos transformados disminuyen linealmente, al igual que en el presente estudio. Este análisis permite inferir que la anchoveta presenta un R óptimo en valores inferiores de TSM en relación con la sardina. Así mismo Cole & Mc Glade (1998), establece que, en el norte de Benguela (sistema ambiental con características similares), existen intervalos donde el R es óptimo, así para la sardina, la relación es positiva y más fuerte con TSM de 19, 20 y 21°C, mientras que para la anchoveta la relación es negativa y fuerte para una TSM 17, 18 y 19°C. Pese a estos resultados no es posible establecer una ventana ambiental óptima en 16°C, debido a que se desconoce el comportamiento del R en el intervalo 16,1-17,8 °C, dejando estos resultados sólo a nivel de supuesto.

En general, se observa que el R (semestral) en el desove principal (julio-septiembre), se produce a intensidades intermedias de turbulencia-surgencia (5-6 m/s) y en temperaturas más bajas (15-16°C), en relación al segundo semestre. Por su parte, el desove secundario (diciembre-enero), también se produce en condiciones intermedias de turbulencia y

surgencia (5-6 m/s), pero a una mayor temperatura (18-19°C) como se muestra en la Tabla 6.

- *Biomasa desovante y reclutamiento*

Para las transformaciones de la BD desarrolladas en los 5 modelos precedentes, se observa en general un comportamiento similar al expuesto en el modelo clásico stock – recluta de Ricker (1954), donde el R sólo es explicado por dicha variable. Se destaca que la transformación de la BD presenta una fase creciente hasta los 1,4 millones de toneladas aproximadamente para luego decrecer. Esto coincide con estudios similares, donde la primera parte de la curva es lineal para luego presentar un descenso (Cury & Roy, 1989; Mendelsohn, 1989; Roy *et al.*, 1992; Cury & Roy, 1995; Yáñez & Espindola, 1998; Daskolov, 1999; Espindola, 2003; Yáñez *et al.*, 2005). Se destaca que la incorporación de un número mayor de variables ambientales no determina la forma de la curva de la BD, puesto que todos los modelos analizados con el algoritmo GAM siguen la tendencia de la forma clásica de Ricker (1954). Esta situación difiere con el análisis de Daskalov (1999), donde la curva R v/s BD tiende a tomar una forma clásica de Ricker, pero la incorporación de variables ambientales afecta la forma de la curva, alejándose del modelo clásico.

La variable BD tanto en el modelo clásico de Ricker como en los modelos simples de GAM, es la variable que más aporta con aproximadamente un 40% de la variabilidad del R. Cabe señalar que en todos los análisis estadísticos desarrollados en el estudio, ya sea tomando en cuenta una, dos ó tres variables, la BD es la única que está presente en todos los modelos (Tabla 6), siendo ésta fundamental (descendencia) en términos de la variabilidad y significancia del modelo, tal como lo indican los modelos clásicos de Ricker (1954) y Beverton & Holt (1957).

Cahuín 2010, indica que bajo un análisis decadal, los forzantes ambientales afectan significativamente la tasa de producción de reclutas de anchoveta, con importantes efectos denso-dependientes de la biomasa en el stock sur del Perú y norte de Chile. Un régimen favorable determina un menor efecto en los procesos denso-dependientes, incrementando el éxito del R. Mientras que un período desfavorable, determina un incremento del efecto en los procesos denso-dependientes, afectando la productividad de la anchoveta y otros recursos pelágicos de corto ciclo de vida. La variabilidad del R parece estar estrechamente relacionada con los cambios en las condiciones ambientales, los que determinarían la formación de hábitats favorables (ó desfavorables) para los procesos de reproducción, migración y R. En este sentido se puede observar en la Tabla 6, que la interacción de las variables ambientales con la BD mejora significativamente la correlación existente entre éstas y el R, a diferencia de modelos univariados.

- *Del método estadístico*

Se emplea un enfoque no-lineal para evaluar la relación entre el R, la BD y las variables ambientales en el stock sur del Perú y norte de Chile para el recurso anchoveta, utilizando tres algoritmos matemáticos distintos (ACE, AVAS y GAM), a diferencia de otros autores que analizan este comportamiento sólo con un método en particular (Cury & Roy, 1989; Paya *et al.*, 1998; Tascheri *et al.*, 1999; Cole, 1999; Yáñez *et al.*, 2001, 2003, 2005). La razón de esto, consiste en comparar la modelación efectuada con cada algoritmo de modo de aumentar la precisión del análisis. En este sentido, los resultados más concluyentes los entrega el algoritmo GAM, ya que proporciona el nivel de significancia de la relación, permitiendo discriminar los modelos óptimos, por la correlación existente entre las variables y por la potencia de la estimación, resultando en una importante herramienta para explorar y modelar relaciones no lineales.

## 7. CONCLUSIÓN

El presente estudio, se enfoca en el análisis del reclutamiento del recurso anchoveta (*Engraulis ringens*) en el stock sur del Perú y norte de Chile y su posible relación con la biomasa de desovante, índice de surgencia, índice de turbulencia y la temperatura superficial del mar, considerando un análisis semestral a partir de 1984 hasta 2010.

Cinco modelos estadísticos fueron ajustados para explicar las variaciones del reclutamiento, determinando que los modelos que consideran los efectos del viento, medidos desde la costa, en la época del desove principal y secundario, muestran en el caso del índice de surgencia valores que fluctúan entre 600 - 711 m<sup>3</sup>/s/1000 m costa que corresponde a una velocidad del viento de 5,2 y 5,6 m/s, respectivamente. En el caso del índice de turbulencia, estos valores fluctúan entre 155 – 190 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>, es decir 5,37 y 5,75 m/s, respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo expresado por diversos autores que consideran que el reclutamiento es maximizado para esta especie a una velocidad del viento de 5-6 m/s para la zona estudiada. Por tanto se establece una ventana ambiental óptima en los 5,26 m/s con una correlación del 63% y un nivel de significancia del 0,023 (Fig. 21).

Los modelos 3, 4 y 5, consideran la temperatura superficial del mar como una aproximación para explicar el reclutamiento, presentando en general un máximo en 16 °C para el stock analizado (curva en forma de domo), sin embargo estos modelos son descartados debido a la inexistencia de valores observados en el rango 16,1-17,8°C.

Se comprueba que un análisis no lineal es adecuado para interpretar las relaciones existentes entre variables biológicas y ambientales. Es así como el algoritmo GAM es una herramienta potente a la hora de determinar relaciones no paramétricas. En el caso particular de la anchoveta, se puede observar la existencia de relaciones funcionales con las variables ambientales. Sin embargo, es necesario destacar que existen variables que no han sido consideradas en el análisis, por ejemplo otras variables ambientales que afectan a los estadios tempranos como la salinidad, la profundidad de la capa de mezcla, oxígeno disuelto ó variables de tipo antrópicas como la sobreexplotación del stock reproductor, la contaminación de las zonas de desove y cría, entre otros, esto con el fin de modelar las reales interacciones entre el reclutamiento y las variables explicatorias y así evaluar de mejor manera los stock explotados.

## 8. REFERENCIAS

- Aldanondo N., U. Cotano & E. Etxebeste. 2011.** Growth of Young-of-year European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay. *Sci. Mar.* 75 (2): 227-235.
- Alheit, J. & E. Hagen. 2001.** The effect of climatic variation on pelagic fish and fisheries. In: Jones, P.D., Ogilvie, A.E.J., Davies, T.D., Briffa, K.R. (Eds.), *History and Climate. Memories of the Future.* Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 247– 265 pp.
- Alheit, J. & M. Ñiquen. 2004.** Regime shift in the Humboldt Current ecosystem. *Prog. Oceanogr.* 60: 201-222 pp.
- Anda J.A., J.C. Seijo & S. Martínez. 1994.** Reclutamiento y variabilidad ambiental en la pesquería de sardina de Monterrey (*Sardinops sagax*) del golfo de California, México. *Invest. Pesq. (Chile)* 38: 23-36 pp.
- Araya M., L. Cubillos & J. Peñailillo. 2008.** Validación de la edad de la anchoveta en la costa de Chile. Informe final corregido 2ª versión. FIP N° 2004-38, 138 pp.
- Arcos, D., C. Gatica, P. Ruiz, A. Sepúlveda, M. Barbieri, R. Alarcón, S. Núñez, J. Chong, J. Córdova, H. Rebolledo, C. González. 2005.** Condición biológica de jurel en alta mar. Proyecto FIP 2004 – 33. Informe Final. 231 pp.
- Bakun, A., D. McLain & F. Mayo. 1974.** The mean annual cycle of coastal upwelling off western North America as observed from surface measurements. *Fish. Bull., U.S.* 72 (3): 843-844 pp.
- Bakun, A. & R. Parrish. 1980.** Environmental inputs to fishery population models for eastern boundary currents regions. UNESCO, IOC Workshop Report 28, 67- 104 pp.
- Bakun, A. 1989.** Recruitment in fishery resources and its relationship to environment: accessible pathways to greater insight. *Pacífico Sur, Número Especial*, 25-34 pp.
- Bakun, A. 1990.** Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science* 247, 198-2001 pp.
- Bakun, A. 1995.** Global climate variations and potential impacts on the Gulf of Guinea sardinella fishery. In: *Dynamics and use of sardinella resources from upwelling off Ghana and Ivory Coast.* F.X. Bard & K.A. Koranteg (Eds.), Editions ORSTOM, Paris, 60-85 pp.

- Bakun, A. 1996.** Patterns in the Ocean: ocean processes and marine population dynamics. University of California Sea Grant, California, USA & Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste, Baja California Sur, México, 323 pp.
- Barber, R.T. & F.P. Chavez. 1983.** Biological consequences of El Niño. *Science* 222: 1203-1210 pp.
- Barbieri, M.A., M. Bravo, M. Farías, A. González, O. Pizarro & E. Yáñez. 1995.** Fenómenos asociados a la estructura térmica superficial del mar observados a través de imágenes satelitales en la zona norte de Chile. *Invest. Mar., Valparaíso*, (23); 99-122 pp.
- Beck, N. & S. Jackman. 1996.** Getting the mean right: Generalized Additive Models. Paper presented at the Annual Meeting of the Midwest Political Science Association, Chicago: 37 pp.
- Bernal, P., F. Robles & O. Rojas. 1983.** Variabilidad física y biológica en la región meridional del sistema de corrientes Chile-Perú. *FAO Fish. Rep.*, (291) Vol. 3: 683-711.
- Bernal, P. 1990.** La oceanografía del sistema de corrientes de Chile-Perú en relación a las pesquerías pelágicas. In: *Perspectivas de la actividad pesquera en Chile*. M.A. Barbieri (Ed.), Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, 35-48 pp.
- Bernal, P., F. Robles & O. Rojas. 1983.** Variabilidad física y biológica en la región meridional del sistema de corrientes Chile-Perú. *FAO Fish. Rep.*, 291(3): 683- 711 pp.
- Beverton, R.J.H & S.J. Holt. 1957.** On the dynamics of exploited fish populations. Reprinted 1996, Chapman & Hall. 533 pp.
- Bilio, M. 1985.** El Niño, su impacto en la fauna marina. Número Extraordinario 3-4 pp.
- Blaxter, J.H.S. & J.S. Hunter, 1982.** The biology of the clupeoid fishes. *Adv. Mar. Biol.* 20: 201-223 pp.
- Bouchon M., C. Peña, E. Díaz, E. Goya, B. Buitrón, S. Sánchez, E. Delgado & J. Mori. 2008.** Información biológica-pesquera de la Región Sur del Perú (2004–2007). Informe Interno Instituto del Mar del Perú, 21 pp.
- Braun, M., J. Castillo, J. Blanco, S. Lillo & H. Reyes. 1995.** Monitoreo hidroacústicos y oceanográfico de los recursos pelágicos en la I y II regiones. Informe final proyecto FIP N°93/15, 172 pp.

- Braun, M., J. Blanco, J. Osses, J. Castillo, & H. Miles. 1999.** Monitoreo acústico estacional de los recursos pelágicos en la I y II regiones. Informe final FIP 97-02. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile. 145 pp.
- Braun, M., H. Reyes, J. Castillo, V. Catasti, V. Valenzuela, M. Pizarro & J. L. Blanco. 2005.** Monitoreo de las condiciones Bio-oceanográficas en la I y II Regiones, año 2003. Informe Final proyecto FIP N° 2003-01. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile. 822 pp.
- Braun, M., V. Valenzuela, P. Moreno, H. Reyes, M. Pizarro, J. Letelier, G. Claramunt, E. Díaz, G. Herrera, J. Sanchez, A. Flores, J. Saavedra & V. Catasti, 2008.** Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II regiones. Informe Final FIP N° 2008-01. 280 pp.+ Anexos
- Breiman, L. & J. H. Fredman 1985.** Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation. *J. Am. statist. Ass.* 80(391): 580-598.
- Butler, J.L. 1989.** Growth during the larval and juvenile stages of the northern anchovy, *Engraulis mordax*, in the California Current during 1980-84. *Fish. Bull.*, 87: 64-652.
- Buitrón, B. & A. Perea. 2000.** Aspectos reproductivos de la anchoveta peruana durante el periodo 1992-2000. *Bol. Inst. Mar Perú*, 19: 45-53.
- Cahuín S. 2010.** Variabilidad del reclutamiento de anchoveta (*Engraulis ringens*) en dos subpoblaciones del Pacífico Sur Oriental y su relación con variables ambientales. Tesis Doctoral en Oceanografía. Universidad de Concepción, Chile. 112 pp.
- Castillo, J., M. Braun & J. Blanco. 1993.** Cuantificación Estacional de la biomasa de los recursos pelágicos y vigilancia bio-oceanográfica, zona norte. Informe Final de Proyecto. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso-Chile. 58 p + anexos.
- Castillo, J., M. Espejo, S. Lillo & J. Cordova. 1997.** Evaluación y distribución espacial de reclutamiento de anchoveta. En: Estimación del reclutamiento de anchoveta en las regiones I y II. Informe Final del proyecto FIP 96-02. Inst., Fom., Pesq., (Valparaíso-Chile). 126 pp+ anexos.
- Castillo, J. 1998.** Evaluación Acústica. En: Evaluación del stock desovante de anchoveta I y II Región. Informe Final proyecto FIP 97-01. Inst., Fom., Pesq., (Valparaíso-Chile), 125 pp+ anexos.
- Castillo J., Córdova J, Espejo M., Barbieri M, Catasti V., Osses J., Reyes H. & P. Barría. 2000.** Evaluación del reclutamiento de anchoveta en la I y II Regiones, 1999. Informe Final FIP N° 99 -11. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile. 209 pp.

- Castillo, J., M. Barbieri, M. Espejo, V. Catasti, S. Núñez, J. Ortiz & P. Barría 2000.** Evaluación acústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur. Informe final FIP 99-13. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile. 230 pp + Tablas y Figuras.
- Castillo J., J. Córdova, A. Saavedra, M. Espejo, P. Gálvez, & M.A. Barbieri 2001.** Evaluación del reclutamiento de anchoveta en la I y II Regiones, temporada 2001-2002. Informe final proyecto FIP N°2001/11, 307 pp.
- Castillo J., A. Saavedra, F. Leiva, H. Reyes, M. Pizarro, V. Catasti, C. Lang, M. San Martín, B. Leiva, F. Cerna, A. López & L. Herrera. 2011.** Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta en la XV y II Regiones, Informe final proyecto FIP N°2010/13, 507 pp.
- Cermeño P, A. Uriarte, B. Morales-nin, M. Cotano & P. Álvarez. 2008.** Setting up interpretation criteria for ageing juvenile European anchovy otoliths. *Sci. Mar.* 72(4): 733-742.
- Cerna, F., C. Machuca., A. López., R. Serra., V. Ojeda., C. Gaspar., L. Muñoz., J. Saavedra., G. Plaza., G. Moyano. & D. Carreño., 2011.** Revisión de la asignación por grupo de edad en la Anchoveta de la zona norte. Instituto de fomento pesquero, FIP 2009-17, 223 pp.
- Chávez, F., J. Ryan, , S. Lluch-Cota & M. Niquén, 2003.** From anchovies to sardines and back: Multidecadal Changes in the Pacific Ocean. *Science* 299: 217-221 pp.
- Chávez, F., A. Bertrand, R. Guevara-Carrasco, P. Soler & J. Csirke. 2008.** The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progr. Oceanogr.* 79: 95–105 pp.
- Cianelli, L., P. Fauchald, K.S. Chan, V.N. Agostini & G.E. Dingsør. 2008.** Spatial fisheries ecology: Recent progress and future prospects. *J. Mar. Sys.* 71:223-236 pp.
- Cole, J. & J. McGlade. 1998.** Clupeoid population variability, the environment and satellite imagery in coastal upwelling systems. *Rev. Fish Biol. Fish.* 8, 445-471 pp.
- Cole, J. 1999.** Environmental conditions, satellite imagery, and clupeoid recruitment in the northern Benguela upwelling system. *Fish. Oceanogr.*, 8(1): 25-38 pp.
- Collie, J.S., K. Richardson & J.H. Steele. 2004.** Regime shifts: can ecological theory illuminate the mechanisms? *Prog. Oceanogr* 60: 281–302 pp.
- Córdova, J., J. Castillo, A. Paillamán & S. Lillo. 1995.** Evaluación Hidroacústica y distribución del recurso. En: Estimación del reclutamiento de anchoveta de la zona norte (I y II Regiones). Informe Final de Proyecto FIP 035-94-01. 122pp+71 figs.

- Csirke, J. 1980.** Recruitment in the Peruvian anchovy and its dependence on the adult population. Rapp. P-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. 177: 307–313 pp.
- Cury, P. & C. Roy. 1989.** Optimal environmental Window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. Can. J. Fish Aquat. Sci., 46: 670-680 pp.
- Cury, P., C. Roy, R. Mendelssohn, A. Bakun, D.M. Husby & R.H. Parrish. 1995.** Moderate is better: exploring non-linear climatic effect on Californian anchovy (*Engraulis mordax*). Can. J. Mar. Aquat. Sci. 127: 417-424 pp.
- Cury, P., A. Bakun, R.J.M. Crawford, A. Jarre, R.A. Quiñones, L.J. Shannon, H.M. Verheye, 2000.** Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems. ICES J. Mar. Sci. 57: 603-618 pp.
- Cushing, D.H. 1975.** Marine ecology and fisheries. Cambridge University Press, London. 278 pp.
- Cushing, D. H. 1990.** Plankton production and year-class strength in fish populations: is update of the match/mismatch hypothesis. Adv. Mar. Biol., 26:250- 294 pp.
- Daskalov, G. 1999.** Relating fish recruitment to stock biomass and physical environmental in the Black Sea using generalized additive models. Inst. Fish., Bulgaria. 22 pp.
- Einarsson, H. & B. Rojas de Mendiola. 1963.** Descripción de huevos y larvas de anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) J. Bol.Inst.Rec.Mar., Callao, 1(1):1-23 pp.
- Elsberry, R. & R. Garwood. 1978.** Sea surface temperature anomaly generation in relation to atmospheric storms. Bull. Amer. Meteor. Soc., 59: 786-789 pp.
- Espindola, F. 2003.** Incorporación de datos del medio ambiente en la relación stock reclutamiento del jurel usando modelos aditivos generalizados. Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción. 11 pp.
- Espino M. 1999.** “El Niño 1997-98”: su efecto sobre el ambiente y los recursos pesqueros en el Perú. Rev. Per. Biol. Vol. Extraordinario. : 97-109 pp.
- Fisher, J.B. & M.J.S. Tevesz. 1958.** Distribution and population density of *Elliptio complanata* (Mollusca) in Lake Pocotopang. Connecticut. The Veliger 18: 332-338 pp.
- Fuenzalida, R., W. Schneider, J. Garcés-Vargas, L. Bravo & C. Lange, 2009.** Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the Eastern South Pacific Ocean. Deep-Sea Research II 56: 992–1003 pp.

- Funamoto, T. & I. Auki. 2002.** Reproductive ecology of Japanese anchovy off the Pacific coast of eastern Honshu, Japan. *J. Fish Biol.*, 60: 154-169.
- Gatica, C., C. Alarcón & L. Cubillos. 2003.** Precisión en los estimados de distribución de frecuencias de tallas de jurel, *Trachurus symmetricus*. *Inv. Mar.*, Valparaíso 31(2):101-106 pp.
- Gutiérrez, M. 2001.** Efecto del evento El Niño 1997-98 sobre la distribución y abundancia de anchoveta (*Engraulis ringens*), p. 55-72. In: J. TARAZONA; W. ARNTZ & E. CASTILLO (Eds). *El Niño en América Latina. Impactos biológicos y sociales*. Lima, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Ed. Omega, 423p.
- Gutiérrez, M., A. Ramírez, S. Bertrand, O. Moron & A. Bertrand. 2008.** Ecological niches, patterns of distribution and areas of overlap of the squat lobster ‘munida’ (*Pleuroncodes monodon*) and anchoveta (*Engraulis ringens*) off Peru. *Prog. Oceanogr.* 79: 256–263 pp.
- Hastie, T., & R. Tibshirani. 1990.** *Generalized additive models*. Chapman & Hall, London. 335 pp.
- Hjort, J. 1914.** Fluctuations in the great fisheries of the northern Europe . *Rapp. P.–V. Réun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 1: 5-38 pp.
- Houde, E. 1987.** Fish early life dynamics and recruitment variability. En: Hayt, R.D. (Ed). 10th. Annual Larval Fish Conference. American. Fish. Soc., Bethesda, Maryland, pp.17-29 pp.
- Hunter, J.R. 1976.** Culture and growth of Northern Anchovy *Engraulis mordax*, larvae. *Fish. Bull.*, 74: 81-88.
- Iles, T. & M. Sinclair. 1982.** Atlantic herring: stock discreteness and abundance. *Sci.* 215: 627-633 pp.
- Jablonski, S. & L.F.L. Legey. 2004.** Quantifying environmental effects on the recruitment of Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*), 1977-1993. *Sci. Mar.*, 68: 385-398 pp.
- Jacob, B. 2002.** Variabilidad espacio temporal de las condiciones oceanográficas físicas y biológicas asociadas a la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile, durante los períodos pre El Niño (1995-96) y El Niño (1997-98). Tesis para optar al título de Ingeniero de Ejecución en Pesca y Acuicultura. Univ. del Mar.
- Kawasaki, T., S. Tanaka, Y. Toba & A. Taniguchi. 1991.** Long term variability of pelagic fish populations and their environment. Pergamon Press, Oxford. 47-60 pp.

- Lambert, Y. & J.D. Dutil. 2000.** Energetic consequences of reproduction in Atlantic cod (*Gadus morhua*) in relation to spawning level of somatic energy reserves. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 57: 815-825.
- Lasker, R. 1978.** The relation between oceanographic conditions and larval anchovy food in the California currents: identification of factors contributing to recruitment failure. *Rapports et Proces-verbaux des Réunions, CEM 173*: 212-230 pp.
- Lasker, R. 1981.** The role of a stable ocean in larval fish survival and subsequent recruitment. In: Lasker R (Ed.) *Marine fish larvae: morphology, ecology and relation to fisheries*. University of Washington Press, Seattle, 80-87 pp.
- Lasker, R. 1985.** What limits clupeoid production?. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42: 31-38 pp.
- Laurence, G.C. 1990.** Growth, survival and recruitment in large marine ecosystems. In Sherman, K., Alexander, L.M and Gold, B.D. (Eds). *Large Marine Ecosystems: Patterns, Processes and Yields*. Washington, DC: Am. Ass. Adv. Sci., 132-150 pp.
- Lessa R, N. Duarte-neto, E. Morize & R. Maciel. 2008.** Otolith microstructure analysis with OTC validation confirms age overestimation in Atlantic thread herring *Opisthonema oglinum* from north-eastern Brazil. *J. Fish Biol.* 73: 1690–1700 pp.
- Lluch-Belda, D., R.J.M. Crawford, T. Kawasaki, A. MacCall, R.H. Parrish, R.A. Schwartzlose & P.E. Smith. 1989.** World wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 8: 195–205 pp.
- Lluch-Belda, D., D. Lluch-Cota, S. Hernandez-Vazquez, C. Salinas-Zavala & R. Schwartzlose. 1991.** Sardine and anchovy spawning as related to temperature and upwelling in the California Current System. *CalCOFI Rep.*, 32: 105-111.
- Lluch-Belda, D., R.A. Schwartzlose, R. Serra, R. Parrish, T. Kawasaki, D. Hedgecock. & R.J.M. Crawford. 1992.** Sardine and anchovy regime fluctuations of abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. *Fish. Oceanogr.* , I,4: 339–347 pp.
- Maravelias, C.D. & D.G. Reid. 1997.** Identifying the effects of oceanographic features and zooplankton on prespawning herring abundance using generalized additive models. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 147: 1-9 pp.
- Marshall, C.T., O.S. Kjesbu, N.A. Yaragina, I. Solemdal & O. Ulltang. 1998.** Is spawner biomass a sensitive measure of the reproductive and recruitment potential of Northeast Arctic. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55: 1766-1783 pp.

- Martínez, C., L. Caballero & G. Bohm. 1991.** Diagnóstico de las principales pesquerías nacionales pelágicas zona norte (I- IV Región) 1990. Estado de situación y perspectiva del recurso. CORFO-IFOP, IFOP AP/91, Santiago, Chile: 94 pp.
- Martínez, C., L. Caballero, G. Böhm, J. Oliva, V. Fernández, S. Peña, R. Gili, H. Hidalgo, P. Barría, R. Serra & M. Nilo. 1995.** Diagnóstico de las principales pesquerías pelágicas zona norte 1994. Estado de situación y perspectivas del recurso. Convenio CORFO-IFOP. Chile. 135 pp.
- Martínez, C., G. Böhm., E. Díaz., F. Cerna., M. Ayala., R. Aravena., H. Reyes., M. Troncoso., V. Bocic., C. Machuca & L. Muñoz. 2007.** Investigación de la situación de la pesquería pelágica de la zona norte, 2006 – Informe Final. Convenio SUBPESCA - IFOP. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile.
- Maturana J, M Bello & M Manley. 2004.** Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. In: Avaria S, J Carrasco, J Rutllant, & E Yáñez (eds). El Niño-La Niña 1997-2000, pp. 13-27. Comité Oceanográfico Nacional, Valparaíso.
- Mendelsoh, R. & J. Mendo. 1987.** Exploratory analysis of anchoveta recruitment off Perú and related environmental series In: D. Pauly y I. Tsukayama (Ed). The peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: three decades of changes. ICLARM Studies and Reviews 15: 294-306 pp.
- Mendelssohn, R. 1989.** Reanalysis of recruitment estimates of the Peruvian anchoveta in relationship to other population parameters and the surrounding environment. In: The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and interactions. Pauly, D., Muck, P., Mendo, J. and I. Tsukayama (Eds.), ICLARM Conf. Proc. 18:364-385 pp.
- Methot R. D. 1983.** Seasonal variation in survival of larval northern anchovy, (*Engraulis mordax*), estimated from the age distribution of juveniles. Fish. Bull., 81: 741-750 pp.
- Mitani, I. 1990.** The biological studies on the larvae of Japanese anchovy, (*Engraulis japonica*) HOUTTUYN, in Sagami Bay. Spec. Rep. Kanagawa Prefectural Fish. Exp. Station, 5: 1-140.
- Montecinos, A. 1991.** Efectos del fenómeno de El Niño en los vientos favorables en la surgencia costera en la zona norte de Chile. Tesis para optar al título de Oceanógrafo, Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- Montecinos, A., S. Purca & O. Pizarro. 2003.** Interannual-to-interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America. Geophys. Res. Letters, 30 (11), 1570.

- Myers, R.A. & N.J. Barrowman. 1996.** Is fish recruitment related to spawners abundance?. Fish. Bull. US, 94: 707-724 pp.
- Odum, E. 1991.** Ecología. Ed. Interamericana. México, 639 pp
- Oliva, J. M. Braun, O. Rojas, E. Díaz, V. Catasti, H. Reyes, P. Barría, R. Serra, G. Claramunt, G. Herrera, P. Pizarro, J. Pizarro y R. Escribano. 2000.** Evaluación del stock desovante de anchoveta en la I y II regiones, Informe Final proyecto FIP N°2000/06, 189 pp.
- Olmos, J., 2005.** Ambiente y reclutamiento del jurel (*Trachurus murphyi*) en la zona centro – sur de Chile. Tesis de escuela ciencias del mar, Universidad Católica de Valparaíso, 65 pp.
- Opazo, R. 2003.** Ventanas ambientales óptimas para los reclutamientos de anchoveta (*Engraulis ringens*) y sardina (*Sardinops sagax*) en la zona norte de Chile. Tesis Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, 63 pp.
- Osses, J. 1990.** Clorofila “a” y variables oceanográficas en el norte de Chile. Chile Pesquero, 58:28-29 pp.
- Parrish, R., C. Nelson & A. Bakun. 1983.** Transport mechanism and reproductive success of fisheries in the California Current. Biol. Oceanogr. 1(2), 175-199 pp.
- Payá, I., A. Sepúlveda, F. Balbontín, R. Tascheri & L. Adasme. 1998.** Dinámica del stock de merluza común y su relación con el medio ambiente. Inst. Fom. Pesq., Informe Proyecto FIP 96-28, 341 pp.
- Peltonen, H., M. Luoto, J. Pääkkönen, M. Karjalainen, A. Tuomaala, J. Pönni, & M. Viitasalo. 2007.** Pelagic fish abundance in relation to regional environmental variation in the Gulf of Finland, northern Baltic Sea. – ICES J. Mar. Sci., 64: 487–495 pp.
- Pierce, D. J., B. Mahmoudi & R.R. Wilson. 2001.** Age and growth of the scaled herring, *Harengula jaguana*, from Florida waters as indicated by microstructure of the sagittae. Fishery Bulletin 99, 202–209 pp.
- Piet, G. J. 2002.** Using external information and GAMs to improve catch-at-age indices for North Sea plaice and sole. – ICES J. Mar. Sci., 59: 624–632 pp.
- Pizarro, O., S. Hormazabal, A. González & E. Yáñez. 1994.** Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. Invest. Mar., Valparaíso, 22: 83 101 pp.

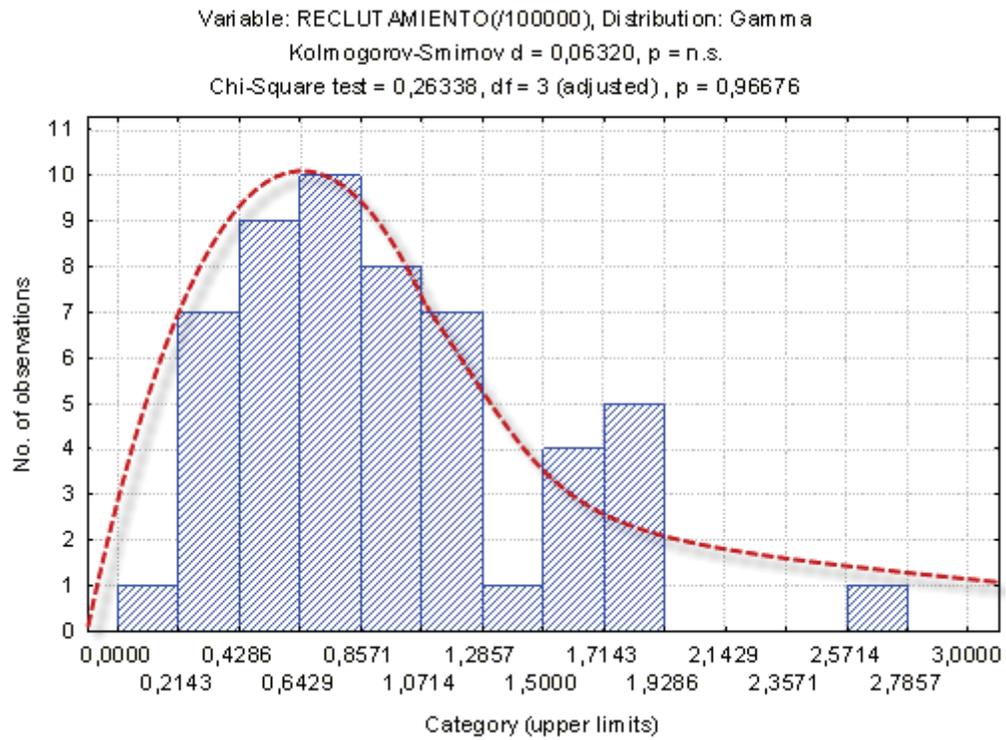
- Pizarro, O. & A. Montecinos. 2004.** Interdecadal variability of the thermocline along the west coast of South America. *Geophys. Res. Letters*: 31, 5 pp.
- Quinn, T.J. II & R.B Deriso. 1999.** Quantitative fish dynamics. Oxford University Press. 542 pp.
- Ricker, W.E. 1954.** Stock and recruitment. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 11:559-623 pp.
- Rothschild, B. & T. Osborn. 1988.** Small scale turbulence and plankton contact rates. *J. Plank. Res.*, 10: 465-474 pp.
- Roy, C. 1990.** Réponses des stocks de poissons pelagiques a la dynamique des upwelling en Afrique de l'Ouest: analyse et modelisation. Thèse Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 149 pp.
- Roy, C., P. Cury & S. Kifani. 1992.** Pelagic fish recruitment success and reproductive strategy in upwelling area-environmental compromises. *S.M.J. Mar. Sci. Suid-Afrikaanse Tydskrifvir Seewetenskap* 12:135-146 pp.
- Santander, H. & R. Flores. 1983.** Los desoves y distribución larval de cuatro especies pelágicas y sus relaciones con las variaciones del medio ambiente marino frente al Perú. *FAO Inf. Pesca*, (292): 3: 835-867 pp.
- Sepúlveda, A., P. Ruiz, P. Núñez, R. Alarcón, C. Oyarzun, S. Gacitúa, R. Quiñones, M. Barbieri, J. Córdova & M. Espejo. 2002.** Condición biológica del jurel en alta mar, año 2002. Proyecto FIP 2002 – 12. Informe final. 160 pp.
- SERNAPESCA. 1994.** Anuario Estadístico de Pesca. Servicio Nacional de Pesca. Chile. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.
- Serra, R. 1983.** Changes in the abundance of pelagic resources along the Chilean coast. In: G.D. Sharp and J. Csirke (Eds.) *Proceedings of the Expert Consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources.* San José, Costa Rica, 18 – 29 April 1983. *FAO Fish. Rep.* 291 (2): 255 – 284 pp.
- Serra R., 1986.** Desarrollo de la pesquería de anchoveta (*Engraulis ringens*) y los cambios de su abundancia. *Invest. Pesq.*, IFOP, Santiago, 33:13-24 pp.
- Serra R., P. Cury & C. Roy. 1998.** The recruitment of the Chilean sardine (*Sardinops sagax*) and the “Optimal environmental window” *In: Global versus changes in upwelling systems.* 267-274 pp.
- Serra, R. & C. Canales, 2010.** Informe final corregido: investigación estatus y estrategias explotación anchoveta y sardina española regiones XV, I Y II, 2010. *Inst. Fom.Pesq.* 67 pp.

- Steele, J.H., 2004.** Regime shifts in the ocean: reconciling observations and theory. *Progr. Oceanogr.* 60: 135–141 pp.
- Stocker, M. & V. Haist. 1985.** Environmental variation and recruitment of Pacific Herring (*Clupea harengus pallasii*) in the strait of Georgia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci* 42: 174 – 180 pp.
- Strub, P., P. Kosro & A. Huyer. 1991.** The nature of the filaments in the California Current System. *J. Geophys. Res.*, 96: 14743 – 14768 pp.
- SUBPESCA., 2008.** Ficha pesquera Anchoveta (*Engraulis ringens*) XV, I y II Regiones. Noviembre 2008, 8 pp.
- Swartzman, G., C. Huang, & S. Kaluzny. 1992.** Spatial analysis of Bering Sea groundfish survey data using generalized additive models. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 49: 1366–1378 pp.
- Swartzman, G., W. Stuetzle, W., K. Kulman, & M. Powojowski. 1994.** Relating the Distribution of Pollock schools in the Bering Sea to environmental factors. *ICES J. Mar. Sci.*, 51: 481-492 pp.
- Swartzman, G. 1997.** Analysis of the summer distribution of fish schools in the Pacific Eastern Boundary Current. *ICES J. Mar. Sci.* 54,1: 106–116 pp.
- Swartzman, G., A. Bertrand, M. Gutierrez, S. Bertrand & L. Vasquez. 2009.** The relationship of anchovy and sardine to water masses in the Peruvian Humboldt Current System from 1983 to 2005. *Progr. Oceanogr.* 79: 228–237 pp.
- Takahashi, M., Y. Watanabe, T. Knoshita & C. Watanabe. 2001.** Growth of larval and early juvenile Japanese anchovy, (*Engraulis japonicas*), in the Kuroshio-Oyashio transition region. *Fish. Oceanogr.*, 10: 235-247.
- Takahashi, M. & Y. Watanabe. 2004.** Staging larval and early juvenile's Japanese anchovy based on the degree of guanine deposition. *J. Fish. Biol.*, 64: 262-267.
- Takasuka, A., Y. Oozeki, H. Kubota, Y. Tsuruta & T. Funamoto. 2005.** Temperature impacts on reproductive parameters for Japanese anchovy: comparison between inshore and offshore waters. *Fish. Res.*, 76: 475-482.
- Tascheri, R., S. Lillo, M. Rojas, R. Gamboa, P. Gálvez, C. Montenegro, M. Braun, V. Valenzuela, H. Miles, H. Rebolledo, C. Cuevas & I. Payá. 1999.** Dinámica espacial y batimétrica de merluza común en relación a su ciclo de vida en la zona centro-sur. Instituto de Fomento Pesquero, Informe Proyecto FIP 97-21, 161 pp.

- Tibshirani, R. 1988.** Estimating transformations for regression via additivity and variance stabilization. *J. Am. Stat. Assoc.* 83(402): 394-405 pp.
- Vergara, J. 1992.** Simulación de un fenómeno de surgencia costera a los 29°5'LS Chile. En: *Rev. Inv. Pes.* N° 37, IFOP, Valparaíso, Chile.
- Wood, S.N. & N.H. Augustin. 2002.** GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecol. Model.* 157:157-177 pp.
- Yáñez E., A. González & M.A. Barbieri. 1995.** Estructura térmica superficial del mar asociada a la distribución espacio-temporal de sardina y anchoveta en la zona norte de Chile entre 1987 y 1992. *Invest. Mar., Valparaíso*, 23; 123-147 pp.
- Yáñez, E. & F. Espindola. 1998.** Análisis de las ventanas ambientales óptimas para los reclutamientos de sardina y anchoveta. *Estudios y Documentos, Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso*, 25/98, 17 pp.
- Yáñez, E., M. A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto & F. Espindola. 2001.** Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. *Progr. Oceanogr.* 49: 581-596 pp.
- Yáñez, E., M.A. Barbieri & C. Silva. 2003.** Fluctuaciones ambientales de baja frecuencia y principales pesquerías pelágicas chilenas. In: E. Yáñez (ed.). *Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile, Escuela de Ciencias del Mar, PUCV, Valparaíso*, 109-121 pp.
- Yáñez, E., C. Silva, A. Órdenes, F. Gómez, A. Valdenegro, N. Silva, S. Hormazabal, A. Montecinos, L. Cubillos, F. Espindola & O. Pizarro. 2005.** Análisis integrado histórico ambiente – recursos, I y II Regiones. Informe Final FIP N° 2003–33. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 164 pp + Anexos.
- Yáñez, E., S. Hormazabal, C. Silva, A. Montecinos, M.A. Barbieri, A. Valdenegro, A. Órdenes & F. Gómez. 2008.** Coupling between the environment and the pelagic resources exploited off northern Chile: ecosystem indicators and a conceptual model. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 36(2): 159-181 pp.

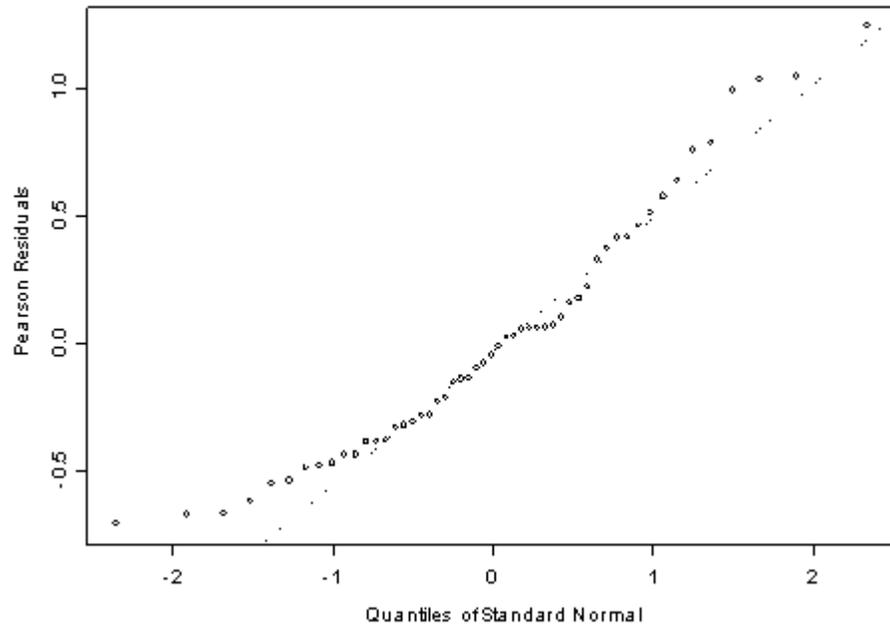
## ANEXOS

### ANEXO I. Test de distribución Kolmogorov – Smirnov para variable dependiente (reclutamiento).

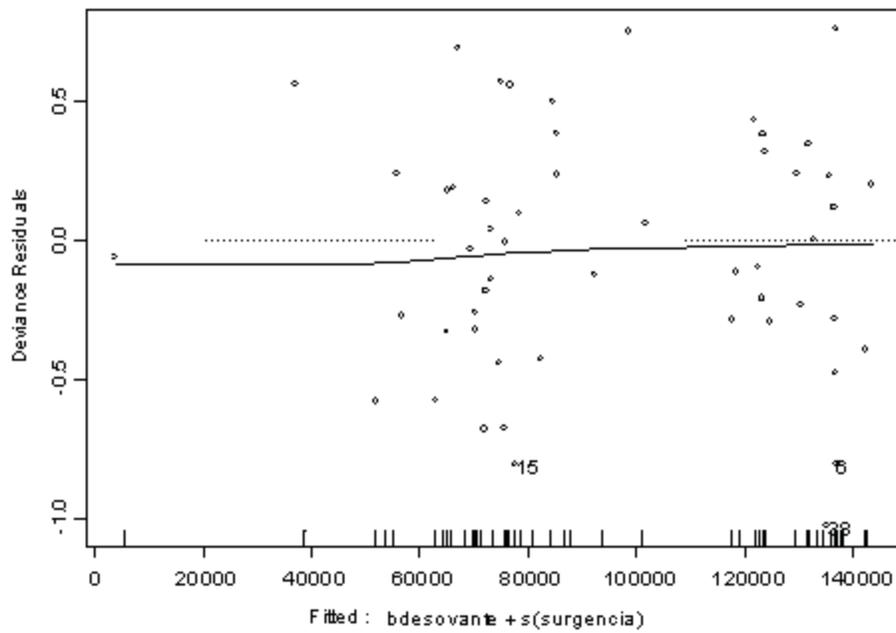


**Figura 34.** Test Kolmogorov-Smirnov para variable reclutamiento.

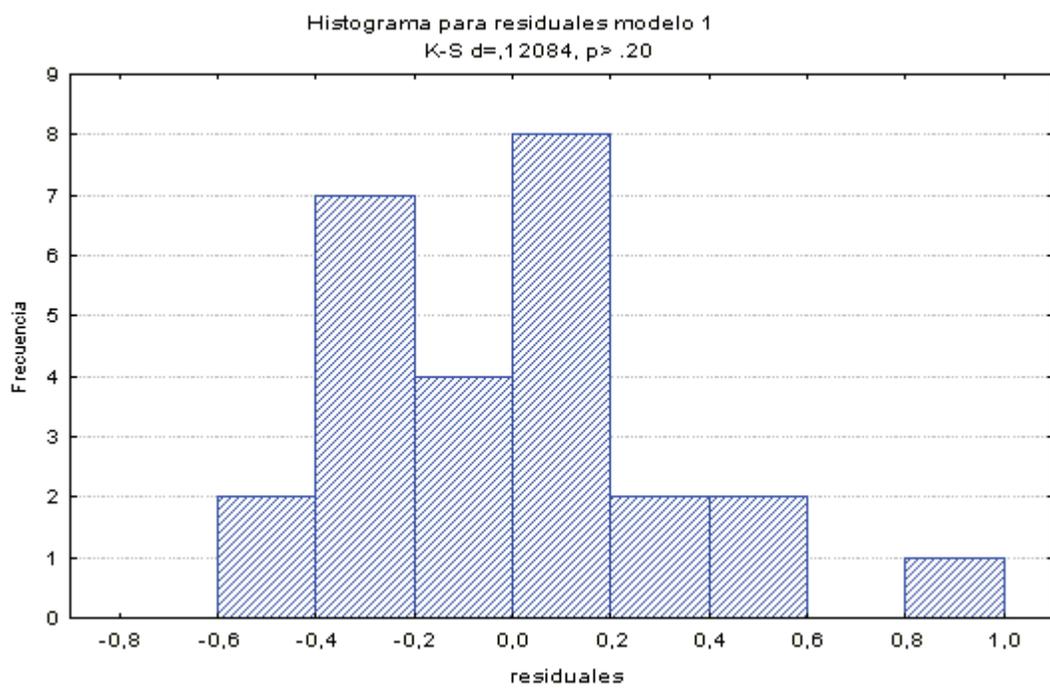
**ANEXO II.** *Supuestos de normalidad, homogeneidad de la varianza y residuos para el algoritmo GAM.*



**Figura 35.** Cuantíales de normalidad para el modelo 1.



**Figura 36.** Homogeneidad de varianza para el modelo 1.



**Figura 37.** Diagnóstico de los residuos para el modelo 1.